



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Facultade de Economía e Empresa

Trabajo de
fin de grado

Transición
energética en la
Unión Europea

Carlos García Muñoz

Tutor/a: Fernando De Llano
Paz

Grado en Economía
Año 2020

Resumen

La Unión Europea cada vez es más consciente de la situación climática actual y del problema energético al que se enfrenta. Para tratar de hacer frente a esta situación, son numerosos los acuerdos internacionales suscritos por la UE, como el Protocolo de Kioto o Acuerdo de París, así como el establecimiento de las líneas maestras que regirán sus actuaciones futuras hasta 2050, como lo es el Pacto Verde Europeo. Además, la UE también tiene como objetivo mejorar la gestión de los recursos disponibles a través de la economía circular. Para poder desarrollar esta estrategia de una manera eficaz no solo es necesario que los gobiernos actúen adecuadamente, sino que también es indispensable la concienciación social de todos los agentes e instituciones implicados.

Uno de los factores más relevantes que afectan al desarrollo económico de la UE en el contexto energético actual es el del problema de la dependencia energética. Por esto, llevar a cabo una transición energética coherente: favorecería la dimensión medioambiental y la económica de los países miembros.

En el trabajo se propone el estudio del diseño eficiente de la cartera de tecnologías para la Unión Europea para los horizontes 2030 y 2040. Mediante la aplicación de la metodología de carteras de Markowitz se calcularon las carteras de inversión eficientes para la UE en estos horizontes en activos reales de generación. Con ello, se pretende saber que fuentes de energía están llamadas a participar en la cartera de generación de electricidad bajo un prisma de eficiencia coste-riesgo. A partir de los resultados obtenidos se pudo corroborar el sistema energético de la UE estará sustentado por las fuentes de energía renovables, en especial de la eólica *onshore*, en detrimento de los combustibles fósiles, los cuales son uno de los principales causantes del efecto invernadero.

The European Union is becoming increasingly aware of the current climate situation and the energy problem it faces. In order to try to deal with this situation, there are numerous international agreements signed by the EU, such as the Kyoto Protocol or the Paris Agreement, as well as the establishment of the guidelines that will govern its

future actions until 2050, such as the European Green Pact. In addition, the EU also aims to improve the management of available resources through the circular economy. To be able to develop this strategy effectively, not only is it necessary for governments to act appropriately, but it is also essential to raise the social awareness of all the agents and institutions involved.

One of the most relevant factors affecting the EU's economic development in the current energy context is the problem of energy dependence. Therefore, carrying out a coherent energy transition would favour the environmental and economic dimension of the member countries.

The work proposes the study of the efficient design of the technology portfolio for the European Union for the 2030 and 2040 horizons. By applying the Markowitz portfolio methodology, efficient investment portfolios were calculated for the EU at these horizons in actual generation assets. The aim is to know which energy sources are called to participate in the electricity generation portfolio from a cost-risk efficiency perspective. From the results obtained it was possible to corroborate that the EU energy system will be supported by renewable energy sources, in particular onshore wind, to the detriment of fossil fuels, which are one of the main causes of the greenhouse effect.

Palabras clave: GEI; cambio climático; energías renovables; transición energética; eficiencia energética.

Índice

Introducción.....	8
1. Problema medioambiental.....	9
1.1 Diferencias entre energía renovable y no renovable.....	9
1.2 El efecto invernadero: ejemplo de externalidad.....	12
1.3 Medidas contra el cambio climático	13
2. Principales acuerdos internacionales	16
2.1 Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)	16
2.2 Protocolo de Kioto.....	16
2.3 Acuerdo de París	17
2.4 El Pacto Verde Europeo.....	18
2.4.1 Economía circular	21
2.4.2 Biodiversidad.....	22
2.4.3 Efectos económicos.....	23
3. Situación energética en la UE.....	25
3.1 Estrategia de los países	25
3.2 Disponibilidad de fuentes de energía.....	26
3.3 Producción de fuentes de energía	27
3.4 Importaciones de energía	28
4. Transición energética	30
4.1 El actual problema energético	30
4.1.1 La eficiencia energética.....	32
4.2 La transición energética	33
4.3 Sostenibilidad energética.....	34
4.4 Movimientos sociales.....	36
5. Selección de carteras eficientes para la UE de activos energéticos	39
5.1 Costes de generación de electricidad	40
5.1.1 Coste de generación de electricidad por tecnología.....	40
5.1.2 Coste esperado de la cartera de generación de electricidad.....	41

5.1.3	Los LCOE	42
5.2	Riesgos de generación de electricidad	43
5.2.1	Riesgo estimado por tecnología	43
5.2.2	Riesgo esperado de la cartera	44
5.3	Modelo tecnológico de Markowitz	46
5.3.1	Expresión matemática del modelo.....	47
5.3.2	Carteras eficientes UE 2020, 2030 y 2040.....	48
5.3.2.1	Año 2020	49
5.3.2.2	Año 2030	49
5.3.2.3	Año 2040	52
5.3.3	Comparación con el modelo de Markowitz puro.....	54
5.3.3.1	Año 2030	54
5.3.3.2	Año 2040	55
Conclusiones		57
Bibliografía.....		59

Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1.- El efecto invernadero. Fuente: United States Protection Agency (EPA) Climate Change 1995.</i>	12
<i>Ilustración 2.- Objetivos sobre la reducción de GEI del Pacto Verde Europeo. Fuente: Comisión Europea (2019e).</i>	19
<i>Ilustración 3.- Objetivos sobre la reducción de GEI del Pacto Verde Europeo. Fuente: European Commission (2019).</i>	20
<i>Ilustración 4.- Medidas de la UE para lograr el desarrollo sostenible. Fuente: European Commission (2019).</i>	23
<i>Ilustración 5.- Fuentes de energía disponibles en la UE en 2017. Fuente de elaboración: Eurostat (2020a).</i>	26
<i>Ilustración 6.- Fuentes de energía producidas en la UE en 2017. Fuente de elaboración: Eurostat (2020b).</i>	28
<i>Ilustración 7.- Proveniencia de las importaciones de petróleo de la UE en 2017. Fuente de elaboración: Eurostat (2020c).</i>	29
<i>Ilustración 8.- Consumo en la UE de energía primaria y final (1990-2020) Fuente: Eurostat.</i>	31
<i>Ilustración 9.- Ciclo de vida del producto. Fuente: International Organisation for Standardisation (ISO).</i>	35
<i>Ilustración 10.- La frontera eficiente y las carteras ineficientes. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).</i>	48
<i>Ilustración 11.- Curva de Markowitz 2030 del modelo tecnológico. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).</i>	50
<i>Ilustración 12.- Comparación de las curvas de Markowitz 2030 y 2040. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).</i>	52

Índice de tablas

Tabla 1. – Evolución del consumo de energías renovables en la UE desde 1995. Fuente: Euroobserver 2001.	9
Tabla 2.- Costes por tecnologías para la UE. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).	41
Tabla 3.- Riesgos de cada tecnología para la UE. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).	44
Tabla 4.- Coeficientes de correlación entre costes de O&M. Fuente: Elaboración propia a partir de datos contenidos en Awerbuch y Yang (2007).	45
Tabla 5.- Matriz de correlaciones entre costes de combustibles y emisiones de CO2. Fuente: elaboración propia a partir de datos de (IEA 2019).	45
Tabla 6.- Límites de participación de las tecnologías para la UE. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).	47
Tabla 7.- Participación de las tecnologías en la cartera actual (2020). Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).	49
Tabla 8.- Carteras de mínimo riesgo y mínimo coste para la UE en 2030. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).	50
Tabla 9.- Carteras de mínimo riesgo y mínimo coste para la UE en 2040. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).	53
Tabla 10.- Comparación resultados 2030 modelo Markowitz puro y modelo tecnológico. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).	55
Tabla 11.- Comparación resultados 2040 modelo Markowitz puro y modelo tecnológico Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).	56

Introducción

Durante muchos años, se ignoró el impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente, considerándolas como insignificantes. Fue a partir del siglo XIX cuando se comenzó a ejercer un cierto control sobre las emisiones de gases contaminantes como el Acta Alkali de 1863 del Reino Unido, que pretendía minimizar el impacto de la industrialización en la salud humana y el medio ambiente. En primer lugar, se puede definir el medio ambiente como: “el entorno en el cual una organización opera, incluyendo el aire, agua, suelo, recursos naturales, flora, fauna, los seres humanos y sus interrelaciones” (Carretero Peña, A., 2018).

A día de hoy, la sociedad es más consciente del problema medioambiental y energético al que se enfrenta, el consumo excesivo de los recursos escasos hace que esta situación se esté agravando cada vez más. Este trabajo nace con el objetivo de aportar un mayor conocimiento sobre la situación energética actual de la UE y para responder al reto de producir electricidad de forma eficiente en los horizontes 2030 y 2040. Para ello, se propone revisar cuáles son las principales fuentes de energía que se emplean en la UE, así como analizar el nivel de dependencia energética. Se explicarán las principales medidas y acuerdos internacionales que se han ratificado en relación con la lucha contra el cambio climático y el agotamiento de los combustibles fósiles. Además, se aplicará un modelo de carteras de tecnologías de Markowitz para estimar la composición de las carteras de inversión eficientes para la UE. Con ello se podrá establecer que tipo de fuentes de energía en las que la UE se basará para producir electricidad en 2030 y 2040.

Antes de empezar, es importante aclarar que este problema no es algo que puedan solucionar los gobiernos por sí solos. Todos los agentes son necesarios (gobiernos, instituciones, ciudadanos, etc.) Las personas estamos llamadas a replantearnos nuestro estilo de vida, para, si es necesario, cambiar aquello que pueda ser lesivo para el medio ambiente o para nuestros vecinos y conciudadanos. . Debemos caminar hacia un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles, mayores niveles de eficiencia en el uso de los recursos y una reducción de la generación de residuos.

1. Problema medioambiental

1.1 Diferencias entre energía renovable y no renovable

En primer lugar, se tratará la principal clasificación de las fuentes de energía: las renovables y las no renovables. Para ello se expondrán sus principales características para comprender las ventajas y desventajas del uso de un tipo en vez del otro.

Las energías renovables son aquellas que se encuentran disponibles en una determinada cantidad para cada periodo de tiempo futuro, es decir, se caracterizan por ser inagotables en un periodo de millones de años y que su uso no supone un gran impacto medioambiental. Según González Velasco, J. (2015) las principales fuentes de energía renovable son: la energía solar, la energía hidráulica, la energía eólica, la biomasa y la geotérmica. La Tabla 1 muestra la evolución en el consumo de las fuentes de energía renovables.

Fuente de energía	Consumo 1995	Consumo 2000	Objetivo 2010
Eólica	0,35	1,83	6,89
Hidroeléctrica	24,8	27	28,8
Solar fotovoltaica	0,002	0,011	0,26
Solar térmica	0,26	0,38	4
Biomasa	44,8	48,65	135
Geotérmica	2,5	3,42	5,2
Total renovables	72,7	81,3	180,16
Consumo Total	1366	1460	1581
% renovable/total	5,3	5,6	11,4

Tabla 1. – Evolución del consumo de energías renovables en la UE desde 1995.

Fuente: Euroobserver 2001.

En la actualidad, la mayor parte de la energía que consumimos es no renovable, sobre todo obtenida a partir de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural. Estas fuentes de energía se encuentran en un número finito de yacimientos, esto significa que lo que se consume no se recupera de manera natural, por lo que las

reservas mundiales se reducen. Además, estas fuentes de energía cumplen una serie de características:

- No hay suficiente cantidad en nuestro territorio: en la UE no tenemos capacidad de autoabastecimiento, por lo que las importan. Esto provoca que la UE tenga una gran dependencia energética y, teniendo en cuenta que se prevé que sus precios aumenten, supone una vulnerabilidad de su sistema económico.
- Son finitas: en la Tierra existe una cierta cantidad de ellas pero que en algún momento se acabará. Además, hay una gran incertidumbre sobre el volumen real de las reservas actuales de petróleo, “la estimación de reservas ha aumentado en un 15% en los últimos 5 años, de modo que los optimistas creen que el pico se alcanzará dentro de 20 o 30 años. Otros datos indican que existen reservas de petróleo para 40 años, de gas natural para 60 y de carbón para 130 años. Mientras tanto, se exploran otras oportunidades en la fabricación de biodiesel a partir de vegetales y plantas, la gasificación de carbón para obtener combustibles líquidos y gaseosos y el desarrollo de automóviles diesel de alto rendimiento” (Creus Sole, 2014).

Otra diferencia es su disponibilidad, las energías renovables tienen el inconveniente de que no se puede controlar su suministro ya que depende de flujos naturales, por ejemplo, no se puede aprovechar el sol en un día lluvioso, ni hacer girar molinos en un día en calma. Sin embargo, con las energías es posible controlar en cada momento la producción de electricidad y el consumo, para ello, únicamente necesitamos disponer de zonas de almacenamiento de combustible y una red de transporte que tenga la capacidad de llevar los recursos fósiles desde el lugar en el que se encuentren hasta la central de producción eléctrica. Esto supone una gran ventaja con respecto a las energías renovables ya que actualmente no disponemos de un sistema de almacenamiento de electricidad a gran escala y, por tanto, la producción de energía debe realizarse en el momento en el que aparezca la demanda. Para Jarauta Rovira, L. (2015) “Este aspecto es uno de los que más condiciona el uso de fuentes renovables para generar electricidad, y supone que si algún día queremos tener electricidad únicamente de fuentes renovables habrá que disponer de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica que tengan una gran capacidad de producción de electricidad instantánea, similar a las centrales eléctricas actuales, de tal manera que puedan competir con ellas en el mercado eléctrico. Sólo así podremos igualar en cada momento la generación y el consumo de electricidad a partir de fuentes renovables”.

Existe una gran controversia sobre la energía nuclear. Esta fuente de energía tiene la capacidad de producir electricidad sin emitir CO₂ como las energías renovables y siempre está disponible como las no renovables. Pero es la agotabilidad de esta fuente de energía la que hace que se considere como no renovable, se estima que el uranio disponible no durará mucho más de cincuenta años, y aunque es cierto que se puede reciclar la “basura nuclear”, esto solo sería una manera de alargar el suministro unos años más. Además, la energía nuclear tiene un gran impacto ambiental y que cuenta con un gran rechazo social debido al riesgo a que se produzca un accidente nuclear.

1.2 El efecto invernadero: ejemplo de externalidad

Durante los últimos años está aumentando la preocupación por el cambio climático, el cual es producido por el efecto invernadero y que resulta muy perjudicial para el medio ambiente y la salud de las personas. En primer lugar, se define el efecto invernadero como un proceso en el que el sol emite energía en forma de ondas de alta frecuencia que penetran la atmósfera terrestre y que son reflejadas por la superficie hacia el espacio, solo que en una frecuencia inferior debido a la baja temperatura de la superficie terrestre. Estas radiaciones tienen una menor capacidad de penetración que las del sol y, debido a esto, parte de ellas son absorbidas por los Gases de Efecto Invernadero (en adelante, GEI) generándose un equilibrio térmico. Este proceso se muestra en la *Ilustración 1*.

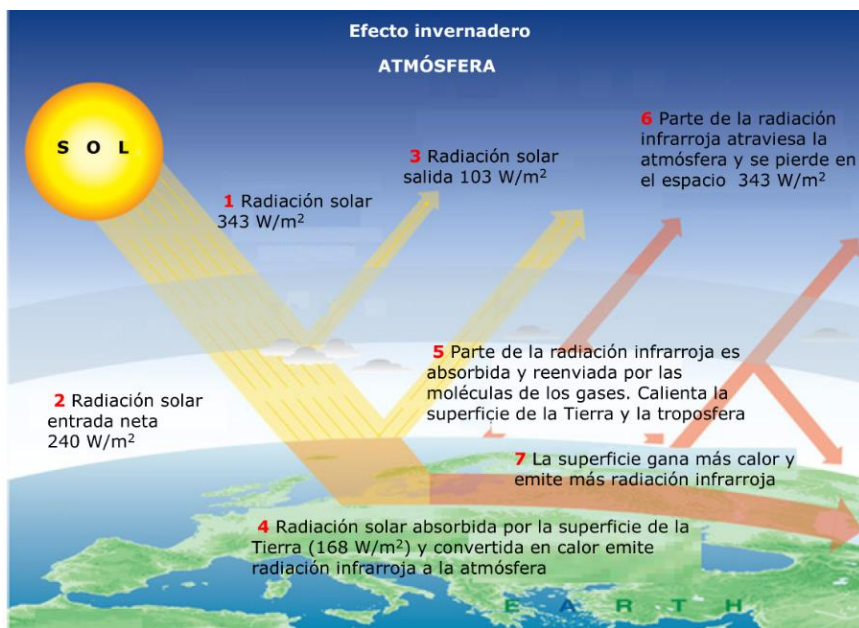


Ilustración 1.- El efecto invernadero. Fuente: United States Protection Agency (EPA) Climate Change 1995.

A diferencia de lo que se pueda pensar, se produce de forma natural y es necesario para que exista vida en la Tierra, ya que sin ellos la temperatura de la superficie terrestre sería de aproximadamente 21°C menos. El problema surge cuando se acumulan demasiados gases en la atmósfera provocando una excesiva absorción de las radiaciones y un aumento de la temperatura terrestre por encima de los niveles óptimos.

El premio nobel de Economía en 2018, William D. Nordhaus, declaró durante el banquete de dicho premio: «Durante el último medio siglo, todas las implicaciones del cambio climático y sus impactos han sido ilustradas por la investigación de científicos en diferentes campos. Estos estudios muestran una imagen cada vez más grave de nuestro futuro bajo un cambio climático incontrolado. La contribución de la economía a este proceso es reconocer que el cambio climático es un efecto secundario, dañino y no deseado del crecimiento económico, que conocemos como una externalidad». Además, esta externalidad tiene cuatro características:

- Globalidad: las emisiones de GEI tienen el mismo efecto con independencia de donde se produzcan.
- Impacto de largo plazo: los gases permanecen en la atmósfera durante periodos muy extensos.
- Incertidumbre: el problema del cambio climático es complicado de tratar ya que no conocemos con certeza sus efectos finales, aunque sí que podemos tratar de predecirlos.
- Irreversibilidad: es por esto que es considerado como uno de los principales problemas de acción colectiva global.

. Por otra parte, el estudio del cambio climático se caracteriza por una elevada incertidumbre. Todo esto se traduce en una actitud de pasividad en el tema mientras se atienden otras cuestiones que parecen más relevantes a corto plazo, sin embargo, es esta actitud la que puede provocar que cuando tratemos de resolver el problema ya sea demasiado tarde.

1.3 Medidas contra el cambio climático

Para evaluar las políticas que competen al cambio climático hay que basarse en tres criterios: su efectividad, es decir, la capacidad para reducir el riesgo derivado del cambio climático, su eficiencia, esto es la capacidad para minimizar todos los costes asociados a la reducción de los niveles de emisión de los GEI y, por último, su equidad, que tiene una gran importancia ya que, aunque la mayor parte de las emisiones de GEI las realizan los países desarrollados, las consecuencias del cambio climático afectan principalmente a los países subdesarrollados.

Desde la Revolución industrial, EE. UU. y la UE son responsables de la mitad de las emisiones. También cabe destacar la creciente participación de India, China y Rusia al stock de GEI (China fue responsable en 2017 del 30% de dicho stock) Además de los problemas de equidad entre países, también surge en los individuos, el 10% de la población más rica del mundo representa aproximadamente el 45% de las emisiones. Por tanto, es necesario a la hora de marcar el precio de las emisiones de GEI llevar a cabo lo que se conoce como “doble dividendo”, es decir, establecer un precio que reduzca las emisiones y que pueda utilizar sus ingresos para reducir los impuestos de otra naturaleza a las rentas más bajas. Ocurre lo mismo con las subvenciones a combustibles fósiles, el 40% de ellas se dirigen al 20% de la población con las rentas más elevadas mientras que solo el 7% repercute al 20% de la población con las rentas más bajas.

Por su parte, la Comisión Europea propone una serie de medidas con el objetivo de paliar el problema medioambiental al que se enfrenta la sociedad actual:

- Integrar de una manera más eficaz las fuentes de energía renovables en la red para desarrollar un sistema sostenible y continuar con el aumento de relevancia que están adquiriendo.
- Promover el desarrollo de tecnologías innovadoras y modernas que aprovechen mejor los recursos. Esto es necesario ya que más del 75% de las emisiones de GEI de la UE se realizan durante los procesos de producción y consumo de la energía (Comisión Europea, 2019e).
- Aumentar la eficiencia energética y el desarrollo de productos más respetuosos con el medio ambiente.
- Reducir las emisiones de carbono en el sector industrial, donde tan solo el 12% de los materiales que se utilizan proceden del reciclaje y suponen el 20% de las emisiones de GEI de la UE (Comisión Europea, 2019g).
- Favorecer la cooperación energética entre los distintos países.
- Aprovechar al máximo el potencial de la energía eólica marina europea, que según un estudio de Vowles, N (2019) tiene potencial para generar 100 veces más electricidad de la que actualmente produce.

Para Belda Hériz, I. (2018) “La política de medio ambiente de la Unión Europea se ha convertido en una de las más ambiciosas, no solo a nivel interno de la propia Unión, sino también a nivel internacional y, así, con más de 200 normas adoptadas desde la década de los 70, se ha convertido en referente mundial y ha ido adoptando

progresivamente, según se producían nuevos avances tecnológicos y científicos que han permitido hallar nuevos descubrimientos, una normativa cada vez más moderna y adaptada, en todo momento, a la realidad social y medioambiental”.

2. Principales acuerdos internacionales

2.1 Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)

En este apartado se expondrán los principales pactos internacionales orientados a la lucha contra el cambio climático en los que participó la UE y que en su mayoría consistieron en medidas para la reducción de las emisiones de GEI.

El primero que se tratará es la CMNUCC, que entró en vigor en 1994 y que fue ratificado por 197 países, cabe destacar que participaron todos los países pertenecientes a la UE. El principal objetivo de este pacto era reconocer que el comportamiento humano afecta al medio ambiente.

El acuerdo presentó una serie de medidas para estabilizar las concentraciones de GEI a un nivel que no resultase peligroso para el medio ambiente y permitir que los ecosistemas se adapten de forma progresiva al cambio climático. El pacto hacía hincapié en 12 países desarrollados del centro y este de Europa que pertenecían a la OCDE, y les marcaba como meta que sus niveles de emisión en el 2000 fueran inferiores a los de 1990.

2.2 Protocolo de Kioto.

En 1997 se produjo el Protocolo de Kioto, que se convirtió en el primer acuerdo universal y legalmente vinculante sobre el problema de las emisiones de GEI y que fue ratificado por 192 de los países de la CMNUCC, incluyendo a todos los países pertenecientes a la UE. El principal inconveniente de este tratado fue que gran parte de los países que más emisiones realizaban no tomaron parte en él y, por ello, solo cubrió

el 12% de las emisiones de GEI totales. Por otro lado, cabe destacar que su actuación estaba estructurada en dos periodos de compromiso:

- El primero (2008-2012) tenía como objetivo que los países industrializados redujesen en un 5% sus emisiones con respecto a las que hacían en 1990.
- El segundo (2013-2020) consistió en que los países que se unieron en este periodo redujesen en un 18% sus emisiones con respecto a los valores de 1990.

2.3 Acuerdo de París

Otro tratado fue el Acuerdo de París firmado en diciembre de 2015 y que hacía referencia a la actuación contra el cambio climático. Sus principales objetivos son:

- Mantener por debajo de 2°C el aumento de la temperatura media global con respecto a los niveles preindustriales y aumentar los esfuerzos para ser capaz de limitarlo a 1,5°C.
- Mejorar la capacidad de los países para hacerle frente a los efectos negativos que provoca el cambio climático.
- Aumentar la inversión en el desarrollo de tecnologías que no perjudiquen al medio ambiente.

Para alcanzar estos objetivos, los 195 países que participaron se comprometieron a reducir sus emisiones de GEI. Por otra parte, los países se acordaron realizar aportaciones monetarias (NDC) para que existiese un fondo de 100 mil millones de dólares anuales a partir del 2020. Este fondo se destinaría a países en desarrollo que necesiten financiación para llevar a cabo las medidas contra el cambio climático.

Por su parte, las NDC se presentan cada 5 años, empezando en 2020 y presentarán una progresión para así mostrar cada vez una mayor ambición por solucionar el problema del cambio climático. En este acuerdo, hay un compromiso a reducir las emisiones de GEI globales en un 85-90% en 2050 en relación con las de 1990. En lo referido a la UE y sus estados miembros, hubo un convenio para reducir en un 40% las emisiones de GEI en el año 2030 con respecto a las que emitían en 1990. El último registro de las NDC se llevó a cabo en 2015 y mostraba como los países pertenecientes a la UE habían decrecido en un 19% sus emisiones a la vez que su PIB había aumentado en un 44%.

2.4 El Pacto Verde Europeo

Este apartado se articula del siguiente modo. En primer lugar, se explicará en que consiste el Pacto Verde Europeo y se tratarán algunas de las medidas que propone. En el punto 2.4.1 se tratará el concepto de “economía circular” y las propuestas que está realizando la Comisión Europea para alcanzarla. A continuación, el punto 2.4.2 expondrá las medidas sobre la biodiversidad que la UE está aplicando o que se plantea aplicar. Por último, en el apartado 2.4.3 mostrará los efectos económicos derivados del Pacto Verde Europeo y las ideas que está manejando la UE para que la transición energética sea lo más liviana posible.

La problemática del cambio climático ha seguido incrementándose con el paso de los años y es por ello que, el año pasado, se produjo el que de momento es el último acuerdo internacional en la lucha contra el cambio climático: el Pacto Verde Europeo. Este tratado consistió en proponer una serie de medidas que deben tomar los países pertenecientes a la UE para ser capaces de desarrollar una economía sostenible y respetuosa con el medio ambiente y repercutiese sobre múltiples sectores de sus economías.

Una de ellas es la descarbonización del sistema energético, esta medida es necesaria ya que actualmente el 75% de las emisiones de GEI de la UE se provocan en la producción y consumo de energía. Para poder conseguirlo es necesario aumentar la eficiencia energética, desarrollar un sector eléctrico basado principalmente en energías renovables, conseguir un suministro energético seguro y asequible y liberalizar el mercado de la energía en la UE. Para lograr este modelo económico sostenible, hay que realizar una mayor inversión en las fuentes de energía renovables. La Ilustración 2 muestra cuáles son los objetivos de reducción de GEI del Pacto Verde Europeo y que tienen como meta final que en el 2050 la UE sea climáticamente neutra.

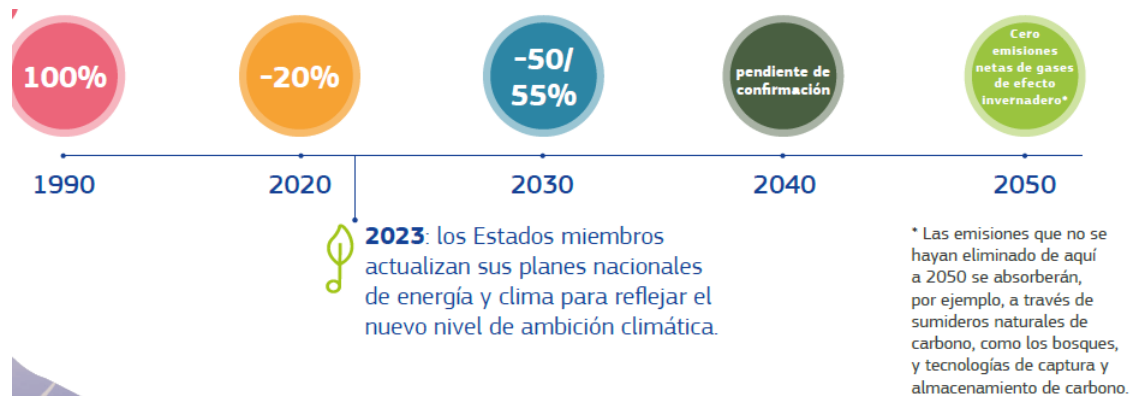


Ilustración 2.- Objetivos sobre la reducción de GEI del Pacto Verde Europeo.

Fuente: Comisión Europea (2019e).

Si se tratan los distintos sectores de la economía por separado, el del transporte es uno de los que mayores emisiones de GEI realiza, representando una cuarta parte del total, y es por ello que el Pacto Verde ha hecho mucho hincapié en que es necesaria una reducción de las emisiones, marcándose como objetivo que en el 2050 se hayan reducido en un 90%. Dentro del transporte, el que se realiza por carretera es el que mayor peso tiene en las emisiones de GEI con un 71,7%, también cabe destacar: aviación civil (13,9%), transporte marítimo y por vías navegables (13,4%), ferrocarril (0,5%) y otros (0,5%). Para conseguir que se reduzcan las emisiones en este sector la Comisión Europea propone una serie de medidas:

- No subvencionar los combustibles fósiles.
- Una reforma del Cielo Único Europeo, que reduciría en un 10% las emisiones del transporte aéreo.
- Utilizar distintos medios de transporte, como por ejemplo el ferrocarril para el transporte de mercancías.
- Aumentar los puntos públicos de recarga de combustibles alternativos sostenibles para el transporte.
- Una normativa más estricta en lo referido a la contaminación de los automóviles.

La industria es otro campo en el que es necesario realizar modificaciones ya que es uno de los que mayores problemas medioambientales genera. Algunos ejemplos de esto son: entre 1970 y el 2017 la extracción global anual de materiales se triplicó, más del 90% de la pérdida de biodiversidad y problemas hídricos están relacionados de manera directa con la extracción de recursos, el 20% de las emisiones de GEI que realiza la UE provienen de industrias o que únicamente el 12% de los materiales que se

utilizan en las industrias de la UE son reciclados. La Comisión Europea ha realizado varias propuestas para modernizar la industria:

- Estimular el desarrollo de nuevos mercados para aquellos productos que sean climáticamente neutros y que entren dentro del concepto de economía circular.
- Reducir las emisiones de carbono de ciertos sectores como: acero, cemento, electrónico, textil, etc. La Ilustración 3 expone la evolución de las emisiones de GEI entre 1990 y 2017.
- Favorecer la reducción y reutilización de materiales, ya que según Comisión Europea (2020) cada ciudadano produce casi media tonelada de residuos al año y para intentar paliarlo se eliminarán progresivamente los productos de un solo uso.
- Promover modelos de negocio de alquiler de los bienes y servicios que habitualmente son de uso único (coches, bicicletas, etc.).
- Conseguir que todos los envases que se fabriquen sean reutilizables o reciclables antes del 2030. Según la Comisión Europea, en el 2017 se produjeron 173 kg de residuos de envases por habitante.
- Utilizar la digitalización para obtener conocimientos relacionados con el consumo energético y de recursos.

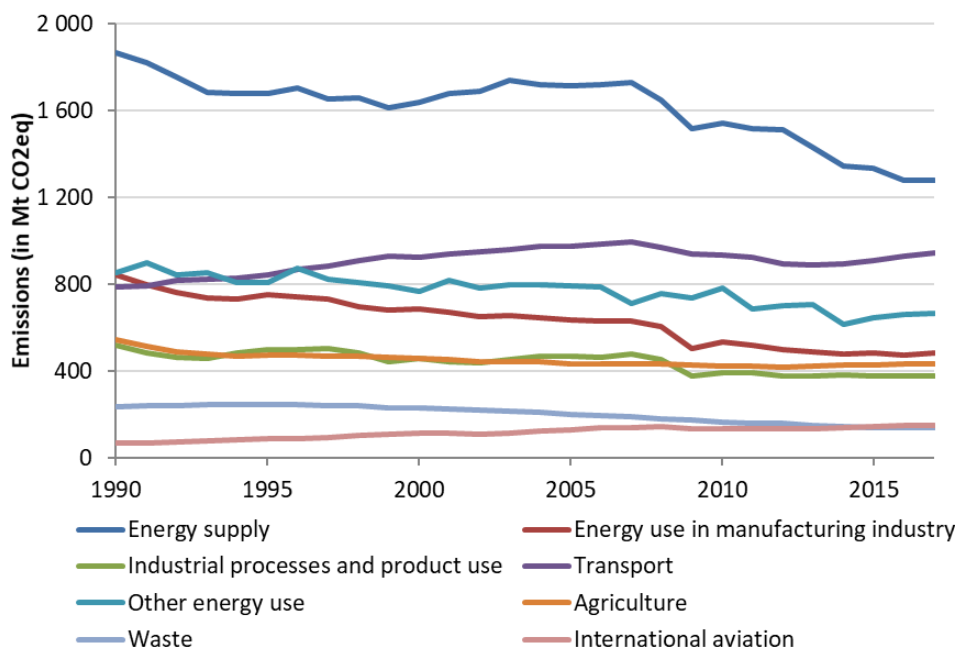


Ilustración 3.- Objetivos sobre la reducción de GEI del Pacto Verde Europeo.

Fuente: European Commission (2019).

2.4.1 Economía circular

Para el desarrollo de una sociedad sostenible es necesario modificar como se gestionan los recursos disponibles y, para ello, el mejor sistema posible es la economía circular. Se define como: Un sistema industrial restaurativo o regenerativo por intención y diseños. Sustituye el concepto de “fin de vida” por la restauración, usa en mayor cantidad las energías renovables, elimina el uso de productos químicos tóxicos, perjudiciales para la reutilización, y tiene como meta la eliminación de residuos (Ellen MacAthurt Foundation, 2012).

Por su parte, la Comisión Europea está valorando la rentabilidad que tendrían los sistemas de recogida con el objetivo de incentivar a la gente a que devuelva los dispositivos que no utilicen y que puedan ser reciclados. La aplicación de este sistema de gestión de los materiales disponibles es importante para el desarrollo de una economía circular en la que los residuos no se ven como basura, sino que se perciben como una potencial materia prima para otros productos o servicios y, por ello, reciben el nombre de “nutrientes técnicos”. La UE busca mediante la implementación de esta estrategia generar un crecimiento sostenible, impulsando la innovación y competitividad de la UE.

Según un estudio realizado por la Comisión Europea (2020) los aparatos eléctricos y electrónicos son los flujos de residuos de la UE que aumentan con mayor rapidez y propone que los productos que se comercialicen en la UE estén diseñados de forma que sean más duraderos y más fáciles de reparar, actualizar, reciclar y reutilizar. De los productos textiles se estima que solo el 1% se recicla, mientras que en lo que se refiere al consumo de plástico se cree que se duplicará en los próximos veinte años.

El sector de la vivienda podría verse beneficiado por un cambio en la manera de gestionar los recursos, ya que el 40% de la energía consumida proviene de aquí. Para solucionar este problema es necesaria una renovación de los edificios mejorando la eficiencia energética tanto públicos como privados que la Comisión Europea estima que debe al menos doblar los porcentajes actuales.

2.4.2 Biodiversidad

El Pacto Verde Europeo también hace referencia a la Biodiversidad y a sus beneficios, es por ello que realiza una serie de propuestas para preservarla:

- Presentará este año una estrategia sobre la actuación con respecto a la Biodiversidad.
- Conseguir que las ciudades europeas sean más ecológicas.
- Aumentar la Biodiversidad en los espacios urbanos.
- Estrategia “de la granja a la mesa”, que consiste en modernizar el sector agrícola para que los miembros de la UE dispongan de productos sostenibles a un precio asequible.
- Aumentar en cantidad y calidad los bosques europeos para lograr la neutralidad climática.
- Promover la importación de productos que no generen deforestación en el extranjero.
- Reconocer la importancia de tener una economía azul, es decir, aceptar el papel fundamental que tienen los mares y océanos como motores de la economía y tratar de aprovechar sus recursos al máximo.

En definitiva, todos los cambios que propone la Comisión Europea (2019d) buscan la eliminación de la contaminación del aire, agua y suelo para combatir el cambio climático. Con este objetivo, la Comisión Europea ha desarrollado una estrategia con varias medidas para cada tipo de contaminación: para hacerle frente a la contaminación del agua hay que reducir la creación de residuos biológicos, plásticos y farmacéuticos estimulando el modelo de economía circular, para la contaminación del aire propone una modificación de las normas con respecto a la calidad del aire y prevenir los accidentes industriales y, por último, para reducir la contaminación del suelo promueve una estrategia novedosa sobre productos químicos para intentar conseguir un entorno libre de toxicidad.

2.4.3 Efectos económicos

Las medidas que propone el Pacto Verde Europeo tienen una clara consecuencias económicas que pueden resultar muy perjudiciales para los países en los que su economía tenga una gran dependencia de los combustibles fósiles. Para que esta transición energética sea lo menos traumática posible, la UE proporcionará apoyo financiero y asistencia técnica a las personas, empresas y regiones más afectadas por la transición hacia la economía verde. Para ello recurrirá al denominado Mecanismo para una Transición Justa, que contribuirá a movilizar al menos 100.000 millones de euros, durante el período 2021-2027 en las regiones más afectadas.

Además, la Comisión Europea también considera que la UE tiene la capacidad colectiva de transformar su economía y sociedad para situarla en un camino más sostenible a través del aprovechamiento de sus fortalezas como líder mundial en medidas ambientales, protección del consumidor y derechos de los trabajadores. Para ello, será necesario realizar una inversión pública masiva y un mayor esfuerzo para que el capital privado se dirija hacia la acción climática y ambiental, mientras se evitan las actividades insostenibles. La UE también debe esforzarse en coordinar los esfuerzos internacionales para construir un sistema financiero coherente con las medidas sostenibles que se adopten. La Ilustración 4 muestra cuáles son las principales medidas que debe tomar la UE para alcanzar el desarrollo sostenible.

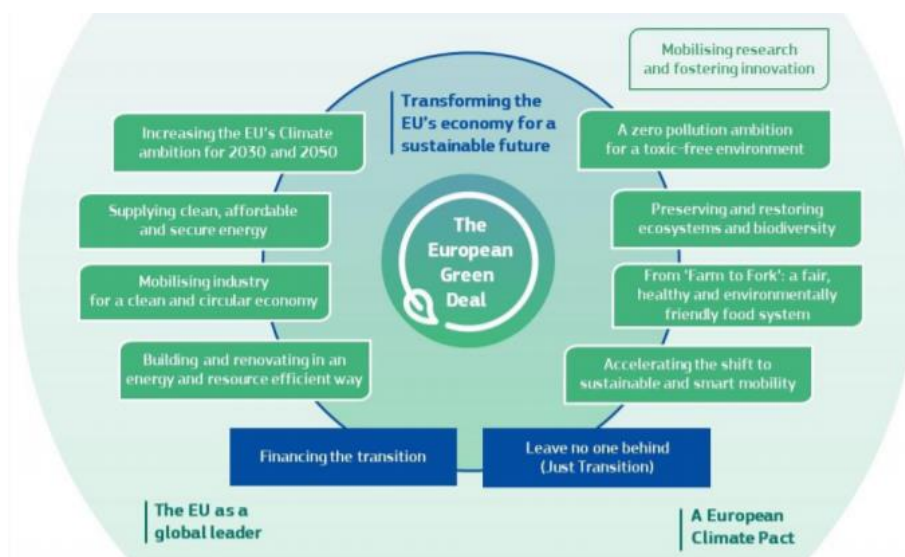


Ilustración 4.- Medidas de la UE para lograr el desarrollo sostenible. Fuente: European Commission (2019).

Las decisiones que se están tomando están resultando muy satisfactorias como puede verse en que entre 1990 y 2018, la UE redujo en un 23% sus emisiones de GEI mientras que hubo un crecimiento económico del 61%. Sin embargo, se estima que con las políticas actuales se reduciría un 60% de las emisiones de GEI en 2050 y, por tanto, no se cumpliría el objetivo ya nombrado anteriormente de conseguir que la UE sea climáticamente neutra ese año. Debido a esto, la Comisión Europea presentará en verano de 2020 un plan para conseguir que se reduzcan todavía más estas emisiones (*European Commission*, 2019).

3. Situación energética en la UE

3.1 Estrategia de los países

Como ya hemos visto en puntos anteriores, existe un problema energético debido a la ingente demanda y que además tiene unas claras consecuencias medioambientales que van desde la deforestación hasta la contaminación atmosférica. Ante esta situación, la UE ha propuesto una estrategia de desarrollo basada en cinco puntos para tratar de combatir el problema antes de que se vuelva irreversible:

- Seguridad energética, solidaridad y confianza: diversificar las fuentes de energía que se consumen en Europa y aumentar la eficiencia de la energía empleada por los miembros de la UE.
- Mercado energético interno: eliminar las barreras regulatorias sobre la energía para que pueda fluir libremente entre los países de la UE. Esto mejoraría la competitividad de los proveedores y permitiría vender energía a mejor precio.
- Eficiencia energética: un aumento permitiría poder minorar el consumo energético y de esta manera reducir la contaminación. Además, un menor consumo energético sería algo beneficioso para la UE desde un punto de vista económico ya que podría reducir sus importaciones.
- Descarbonizar la economía: es necesario desarrollar tecnologías e infraestructuras que sean menos contaminantes.
- Investigación, innovación y competitividad: hay que apoyar el descubrimiento y desarrollo de tecnologías que usen poco carbono aumentando la inversión y que se puede realizar en asociación con el sector privado.

3.2 Disponibilidad de fuentes de energía

Para poder comprender el problema energético de la UE es necesario identificar las fuentes de energía que utiliza y de dónde provienen. Con este propósito, se han utilizado datos Eurostat y se han realizado varios gráficos que se comentarán a continuación.

El primer punto tratará sobre la disponibilidad de las fuentes de energía para la UE. La UE tiene una fuerte dependencia energética del exterior, lo cual se puede apreciar en que solo el 45% de la energía que utiliza es producida dentro de su territorio. Como muestra la Ilustración 5, la mayor parte de la energía que se emplea en la UE proviene de fuentes relacionadas con los combustibles fósiles, destacando sobre el resto el petróleo con más de un tercio del total, mientras que las fuentes de energía renovables representan un 14% del total.

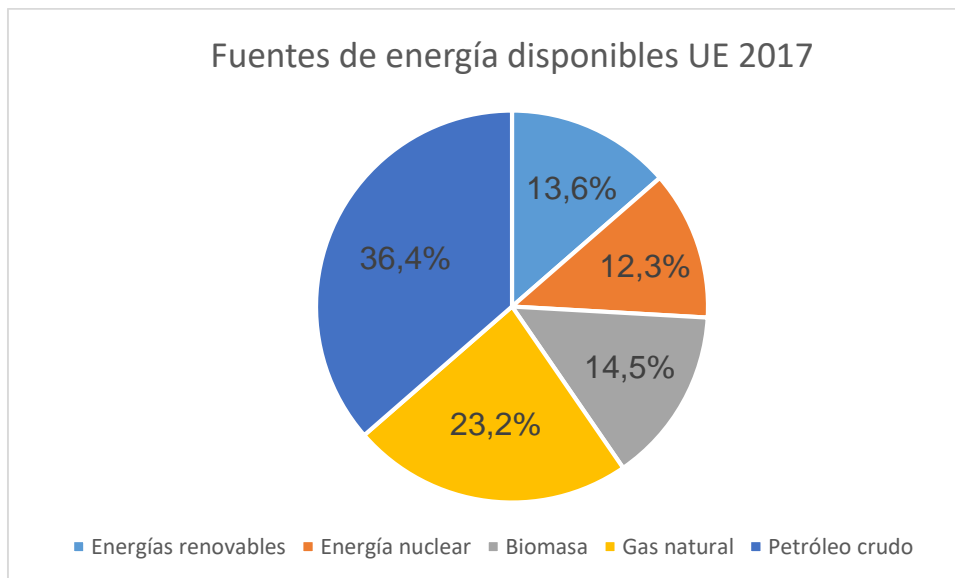


Ilustración 5.- Fuentes de energía disponibles en la UE en 2017. Fuente de elaboración: Eurostat (2020a).

Estos datos representan la media total, sin embargo, se dan grandes disparidades entre los distintos países: existen países con una gran dependencia del petróleo como Chipre y Malta donde cerca del 90% de su energía disponible es de este tipo, en otros como Italia o Países Bajos el gas natural representa más de un tercio de su energía disponible, hay países donde la biomasa es la fuente de energía principal como Estonia (71%) y Polonia (48%), por otro lado, los países que disponen de más

energía nuclear son Francia (40%) y Suecia (31%) y, por último, Letonia y Suecia son los países donde hay una mayor disponibilidad de energías renovables con un 40% cada uno.

En lo referente a las energías renovables, existe una tendencia cada vez mayor hacia su consumo, en la UE pasó de suponer un 8,5% en 2004 a un 17,5% en 2017. Además, se pretende que el 2030 este porcentaje aumente hasta un 32%. Los países en los que este tipo de energías tiene una mayor importancia son Suecia (54,5%), Finlandia (41%) y Letonia (39%) mientras que los países en los que es menor son Luxemburgo (6,4%), Países Bajos (6,6%) y Malta (7,2%).

3.3 Producción de fuentes de energía

Una vez que se han expuesto las fuentes de energía de las que disponen para su consumo los países de la UE, es necesario hablar de cuáles son las principales fuentes de energía que se producen dentro de este territorio. Como se puede observar en la Ilustración 6, existe una gran diferencia entre la energía que produce la UE y la que consume, las renovables son el principal tipo de energía que genera representando casi un tercio del total, mientras que la que menos produce es el petróleo, a pesar de que es la fuente de energía que más se utiliza. Aquí se encuentra el principal motivo, junto al medioambiental, por el que la UE debe llevar a cabo una transición energética, para reducir las importaciones energéticas que suponen un importe déficit en su balanza de pagos y que permitiría que la UE aprovechara en mayor medida la energía que se origina en su territorio.

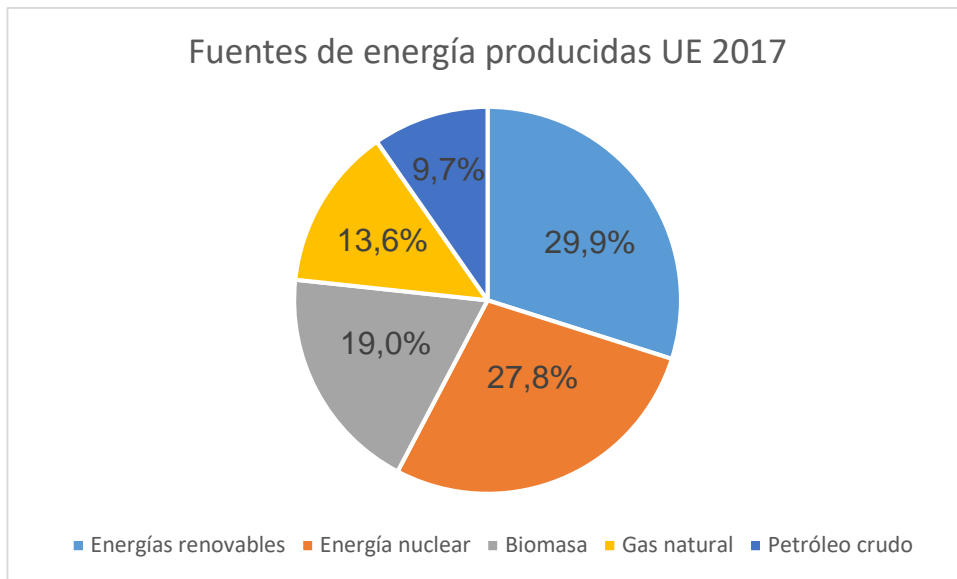


Ilustración 6.- Fuentes de energía producidas en la UE en 2017. Fuente de elaboración: Eurostat (2020b).

Al igual que ocurría en el consumo, en la producción de las distintas fuentes de energía también existe una gran diferencia entre países. Hay países que producen principalmente energía nuclear como Francia (79%) y Bélgica (74%), en otros como Portugal, Letonia, Malta, Chipre y Lituania las energías renovables suponen cerca del 90% de su producción, los países donde la biomasa es la fuente de energía más importante son Polonia y Estonia donde representa cerca de tres cuartas partes del total, mientras que el gas natural lo es en Países Bajos (80%) y, por último, el petróleo crudo es la fuente de energía con mayor peso en la producción de Dinamarca (44%).

3.4 Importaciones de energía

Si se estudian las importaciones de energía que realizan los miembros de la UE, el petróleo (incluyendo el crudo) es la fuente de energía que mayor peso tiene con cerca de dos tercios del total, seguida por el gas natural (26%) y el carbón (8%). Si se analiza de donde provienen las importaciones de cada fuente de energía, como expone la Ilustración 7, se puede ver como los principales proveedores de petróleo son Rusia (30%), Noruega (11%) e Irak (8%).

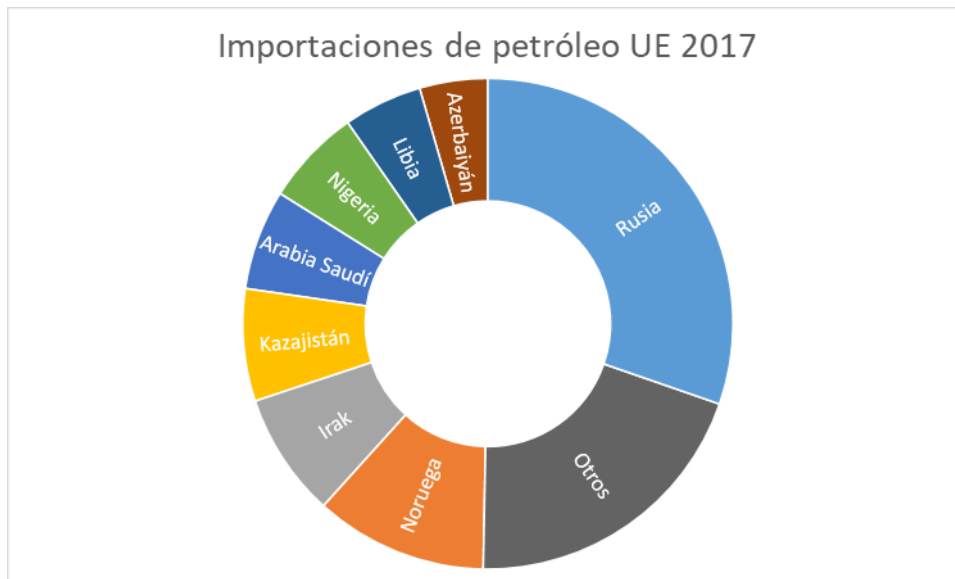


Ilustración 7.- Proveniencia de las importaciones de petróleo de la UE en 2017.
Fuente de elaboración: Eurostat (2020c).

Por su parte, los principales proveedores de gas natural son Rusia, Noruega y Argelia que suponen conjuntamente el 77% del total de sus importaciones. Por último, las importaciones de carbón provienen en su mayor parte de Rusia (39%), Colombia y EE.UU. (con un 17% cada uno). Del mismo modo que para la producción y el consumo, se mostrarán los países en los que tiene una mayor relevancia cada fuente de energía: el 80% de las importaciones de son Chipre, Malta, Rumanía, Grecia y Suecia son petróleo, mientras que en otros países como Austria, Alemania, Italia y Hungría el gas natural supone más de un tercio del total y, por su parte, Eslovaquia es el país donde mayor peso tiene la biomasa con un 15%.

En base a los datos aportados previamente, se puede observar como la UE tiene una gran dependencia energética del exterior y que, además, la mayor parte de sus importaciones proviene de un número reducido de proveedores lo cual les puede generar preocupaciones futuras en caso de escasez de dichas fuentes de energía, problemas en los países proveedores y supone también una reducción del poder de negociación. Esto lo refuta una ratio que se conoce como “grado de dependencia energética”, que en la UE en el 2017 era del 55%, lo que significa que más de la mitad de la energía consumida por los países miembros de la UE es importada. Este dato que ya de por sí es preocupante, todavía lo es más al observar que la dependencia del exterior está aumentando (en el año 2000 era del 47%).

4. Transición energética

4.1 El actual problema energético

Las necesidades energéticas del ser humano han ido aumentando a medida que ha evolucionado la sociedad, se estima que desde 1960 el uso de energía mundial está creciendo a una tasa promedio anual del 2,6%, haciéndose máximas en lo que a día de hoy conocemos como “era tecnológica”, una situación en la que nuestras vidas dependen en gran medida del suministro eléctrico. González Velasco, J. (2015) “considera que la demanda energética mundial aumentará en un 70% en los próximos treinta años y que, según este mismo organismo, el carbón duplicará su contribución al mercado energético mundial en los próximos cincuenta años, se han presentado diferentes proyectos de centrales térmicas basadas en la combustión de carbón, por medio de los cuales se pretende incrementar en un 10% la eficiencia de conversión, lo que iría unido a una reducción en el 25% de las emisiones de CO₂ y de otros gases contaminantes”.

Este aumento de su demanda se debe a que en la sociedad actual hay sectores como el doméstico o el de transporte que requieren una gran cantidad de energía, siendo estos sectores fundamentales para el funcionamiento de la sociedad tal y como la conocemos. Es debido a esto que podemos caer en un “problema energético” ya que si la demanda aumenta hasta tal punto que supera a la energía disponible se produciría un desabastecimiento. Además, no podemos considerar este problema como algo aislado, porque está en gran medida relacionado con otras de las principales preocupaciones actuales: el cambio climático y los conflictos energéticos internacionales.

Ante esta situación surgen dos posibles soluciones: aumentar el suministro energético o reducir la demanda energética, aunque cabe considerar que ambas medidas suponen un gran reto tecnológico. La medida por la que parece que se ha

decantado la UE es la de la reducción del consumo, como puede verse en la Ilustración 8.

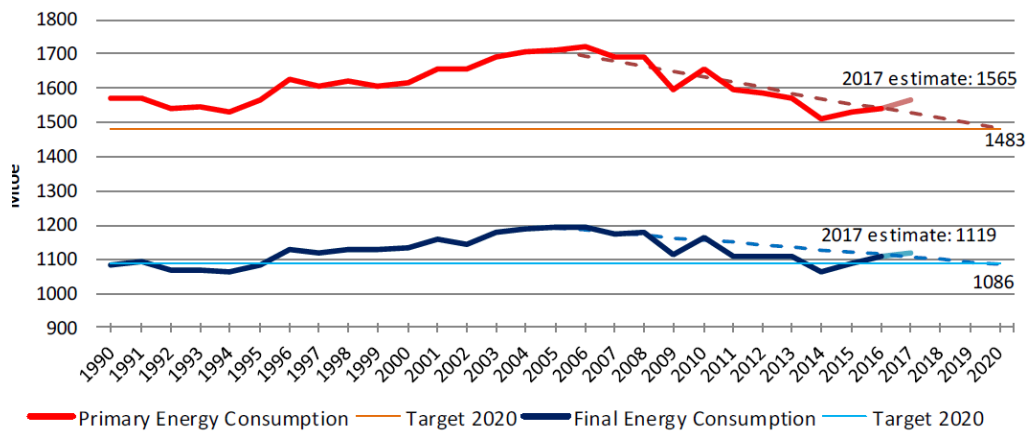


Ilustración 8.- Consumo en la UE de energía primaria y final (1990-2020) Fuente: Eurostat.

En el 2016 se produjo una reducción del 2% en el consumo de energía primaria en comparación con 1990, mientras que el PIB aumentó en un 54% durante este periodo de tiempo. También podemos observar como la mayor caída del consumo se produjo entre 2006 y 2014, con el consumo primario reduciéndose un 12% y la demanda final bajando un 11%. Sin embargo, a partir de este año está volviendo a aumentar el consumo debido a que los inviernos han sido más fríos, el crecimiento económico continuo y a que los precios de los combustibles han decrecido.

Otra de las maneras de conseguir el ahorro energético es mediante la construcción de edificios que puedan mantenerse con gastos energéticos mínimos, ya que las viviendas particulares, los edificios industriales, institucionales y comerciales son responsables de una gran parte del consumo energético. Para ello, se ha desarrollado lo que se conoce como “arquitectura bioclimática”, que consiste en incorporar a la construcción elementos tanto activos como pasivos que faciliten el uso de energías provenientes de fuentes de energía renovables y tradicionales, siempre respetando unas normas de urbanismo. Norton, R. Norton, R. & Spiegel, E. (2010) consideran que para conseguir un suministro energético suficiente que permita un desarrollo económico continuo y reducir las emisiones de GEI, hay que llevar a cabo un cambio tecnológico sin precedentes en la historia, que parece que ya ha comenzado a fraguarse como puede verse desde el incremento en el uso de los biocombustibles y automóviles

híbridos hasta la oposición popular contra la construcción de nuevas centrales eléctricas a base de carbón.

4.1.1 La eficiencia energética

Una de las maneras más rentables de reducir el consumo energético es aumentando su eficiencia, durante los procesos de transformación a los que sometemos a la energía hasta que esté disponible para el consumo se pierde energía, es decir, no es lo mismo la cantidad de energía total y la cantidad de energía útil y cuanto mayor sea esta disipación, menor será su eficiencia. El *Climate Change Performance Index* (CCPI) es un indicador que realiza el *Climate Action Network International*, *Germanwatch* y el *New Climate Institute*, que se lleva publicando anualmente desde el 2005. “El CCPI es una herramienta de monitoreo independiente del desempeño de la protección climática de los países. Su objetivo es mejorar la transparencia en la política climática internacional y permite la comparabilidad de los esfuerzos de protección climática y el progreso realizado por los países individuales” (*Climate Change Performance Index*, s.f.) Este índice compara el desempeño de 56 países y de la UE, lo que representa el 90% de las emisiones totales y está basado en un 80% en datos objetivos relacionados con las emisiones presentes y pasadas de GEI y en un 20% en la valoración que realizan trescientos expertos de todo el mundo de la política climática que se aplica. En los datos aportados para 2019, los mejores países son nórdicos, siendo el mejor Suecia mientras que los peores del ranking son EE.UU. y Arabia Saudí. Por su parte, España ocupa el puesto 35, y tiene una calificación “baja”.

Existen grandes diferencias en la eficiencia de las transformaciones energéticas según donde se produzcan, por ejemplo, en las turbinas hidráulicas y en los motores eléctricos es posible alcanzar el 90% mientras que en los motores de combustión interna puede llegar a ser del 10% o en las centrales termoeléctricas del 35%. Algunas de las soluciones que se proponen para mejorar la eficiencia de los procesos de conversión de energía térmica en electricidad son: utilizar turbinas de ciclo de gas combinado, de esta manera se lograría alcanzar un 50% de eficiencia energética y otra es llevar a cabo “procesos cascada”, esto consiste en que el calor de desecho se utiliza para suministrar calefacción y agua caliente a viviendas que se encuentren cerca de la central. El sistema energético global utiliza principalmente centrales eléctricas de energía fósil cuyos rendimientos son de entre el 40-50%.

4.2 La transición energética

En la historia de la humanidad nunca se ha llevado a cabo una transición energética como tal, sino que se ha producido un proceso de adición de nuevas fuentes de energía a las ya existentes. Esto lo podemos apreciar, por ejemplo, en que en 1800 la biomasa aportaba casi el 100% de la energía mientras que a día de hoy supone cerca del 10%. El carbón, por su parte, pasó de corresponder al 44% en 1925 a ser el 28% actualmente. El petróleo y el gas natural correspondían al 62% en 1973 a ser el 57% a día de hoy.

En contra de lo que podamos pensar con estos datos, aunque en términos relativos se ha disminuido el uso de estas fuentes de energía, en términos absolutos se ha aumentado. La biomasa aumentó un 275% con respecto a la que se usaba en 1800, el carbón ha aumentado ocho veces su uso desde 1900 y, por su parte, el uso de petróleo y gas se ha duplicado con respecto a 1973. Una de las maneras de reducir la emisión de CO₂ a la atmósfera consiste en utilizar las fuentes de energía que produzcan una menor cantidad por unidad de energía liberada en la combustión, el carbón, por ejemplo, se convierte casi en su totalidad en CO₂, mientras que el gas natural que principalmente está formado por metano, en su combustión se produce tanto CO₂ como agua y genera menos CO₂ que el carbón por unidad energética producida. Por otro lado, el petróleo da lugar a una cifra situada entre la del gas natural y el carbón, por ello, es recomendable que los transportes y la calefacción se abastezcan de gas natural.

Un gran inconveniente para la transición energética es el factor económico, las industrias del petróleo, gas, automotrices y de la energía eléctrica son algunas de las que tienen un mayor coeficiente de capital (son industrias con una gran solvencia) y de las que tienen un mayor tamaño, por no nombrar que el diseño y construcción de nuevas plantas energéticas supondría un trabajo arduo y laborioso que sobre todo para las compañías que tengan una gran dependencia de la energía como un insumo primario sería un gran desafío. Además, muchas de estas compañías han realizado fuertes inversiones en infraestructura e instalaciones de producción, lo que actúan como incentivos a mantener el estado actual. Las subvenciones que recibe cada fuente de energía es otro inconveniente para la transición energética, en 2017 los combustibles fósiles recibieron de forma directa subvenciones por valor de 300.000 millones mientras que las energías renovables no recibieron ni la mitad. Cabe destacar que las energías

renovables, a diferencia de las no renovables, generan externalidades positivas, debido al “spillover tecnológico¹”.

Por todo lo anteriormente dicho, los sectores del transporte y de la producción de energía eléctrica serán los más afectados por el cambio energético, aunque eso no quita que vaya a ser un proceso lento y progresivo que durará varias décadas, siendo el mayor motivo de este retraso la dificultad para obtener la inversión necesaria en los distintos componentes del sistema energético. Los países que adopten una postura más conservadora obtendrán un mayor beneficio a corto plazo, pero correrán el riesgo de que una vez que se manifieste el cambio sufran grandes pérdidas económicas. Los países que más inviertan en las nuevas fuentes de energía se enfrentarán a grandes retos y complicaciones a corto plazo, pero se situarán en los primeros puestos para encabezar la economía global a largo plazo.

4.3 Sostenibilidad energética

La definición clásica de desarrollo sostenible, lo considera como el progreso que pueda satisfacer las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. De esto se puede extraer que la sostenibilidad se sostiene sobre tres pilares:

- Continuidad: que sea capaz de mantenerse a lo largo del tiempo.
- Orientación: en este punto nos referimos a un significado normativo, es decir, las decisiones, normas, etc. deben ir dirigidas a la consecución de la sustentabilidad.
- Relaciones: un desarrollo sostenible es aquel que no compromete a las futuras generaciones, por tanto, hay que tratar de promover la armonía entre los humanos y entre la humanidad y la naturaleza.

Si se pretende alcanzar la sostenibilidad, es necesario alargar el ciclo de vida de los productos mediante un proceso de reciclado continuo de los recursos escasos, para generar menos residuos y mantener su disponibilidad. Para Dwyer, B. (2017) “el ciclo de vida se define como las etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema de producto, desde la adquisición de la materia prima o la generación de los recursos naturales hasta la disposición final”. Por tanto, la sostenibilidad trata de abordar la

¹ Spillover tecnológico: apropiación por parte de terceros del conocimiento derivado de la inversión inicial de la empresa.

degradación ambiental satisfaciendo al mismo tiempo las necesidades sociales y económicas de los individuos. En la Ilustración 9 aparecen las etapas que forman el ciclo de vida del producto.



Ilustración 9.- Ciclo de vida del producto. Fuente: International Organisation for Standardisation (ISO).

Un término que está ganando cada vez más relevancia es el “Supply chain Management” (gestión de la cadena de suministro) que consiste en gestionar y organizar las actividades de adquisición, producción y distribución de los bienes que la empresa pone a disposición de sus clientes. Para que una empresa forme parte de la Supply Chain es necesario que tome decisiones que no se basen únicamente en los costes, por ejemplo, los recursos que utilice la compañía para desarrollar su actividad valorando su origen, los procesos por los que ha pasado y su disponibilidad futura, además, también

es necesario que la sociedad sea consciente que está actuando de una manera sostenible para que se genere imagen de marca.

Para lograr la sostenibilidad, es necesario modificar el estilo de vida de las personas, actualmente basado en un consumo excesivo. Se podría considerar que, en cierto modo, este problema tiene unos trazos filosóficos: las acciones que lleva a cabo cada individuo afecta de una manera ya sea directa o indirecta a las acciones que llevan a cabo el resto de personas, de este modo, alcanzar la sostenibilidad es una meta colectiva.

Otro aspecto a resaltar es la relación existente entre la sostenibilidad y el problema energético, para González Velasco (2015) “Los problemas de sostenibilidad se refieren a la relación existente entre el ritmo de consumo energético en el momento actual y las reservas aún existentes de combustibles fósiles, que constituyen las fuentes de las que proviene la mayor parte de la energía”. Este problema, hace referencia a lo ya nombrado en puntos anteriores sobre el agotamiento de las fuentes de energía. Si se pretende solucionarlo es necesaria una transición energética lo antes posible, ya que cuanto más tardemos en realizarla más se agravará la situación.

4.4 Movimientos sociales

La sociedad cada vez está más concienciada sobre el cambio climático y el problema energético, debido a esto, surgieron en Irlanda y Estados Unidos dos movimientos llamados *Post Carbon Cities* (en adelante, PCC) y *Transition Towns* (en adelante, TT) respectivamente, que se caracterizan no solo por buscar una sustitución tecnológica de las energías convencionales, sino también por intentar descentralizar el sistema eléctrico y que sea democrático, eficiente y sostenible.

Los PCC tienen dos enfoques estratégicos muy dispares, el primero se basa en que la transición energética sea un proceso largo y progresivo para que no tener que pasar por ninguna crisis. Para ello, es necesario un desarrollo tecnológico y la construcción de infraestructuras adecuadas al sector de la energía y del transporte. Todas estas decisiones serían tomadas por un grupo de expertos elegidos por las corporaciones municipales. La segunda, por su parte, pretende fortalecer la sociedad y descentralizar la economía. En la realidad, lo que suele suceder es que las grandes

sociedades optan por la primera opción mientras que las pequeñas por la segunda, aunque existen excepciones.

EL TT es un movimiento que considera que es necesario reducir el consumo energético para poder llevar a cabo esta transición. Los integrantes de este movimiento creen que las energías renovables no son capaces de realizar la misma aportación energética que las convencionales. Además, el funcionamiento de este movimiento es necesario crear una organización fuerte y flexible en la que se aceptan a los grupos sociales como miembros. Consideran que la transición es un proceso basado en dos elementos: la comunidad, que debe liderar este proceso, y el Consejo, que se encarga de las áreas de conocimiento que se encuentran fuera de las capacidades de la comunidad y al que deben tratar de influir los miembros de la comunidad para que sus decisiones sean las más convenientes.

La principal diferencia entre los dos movimientos es que el PCC pretende llevar a cabo la transición energética mediante las decisiones que tome un grupo de pensadores mientras que el TT busca conseguirla gracias al trabajo tanto teórico como práctico que desarrollen los grupos base.

Por otro lado, existen varias corrientes de pensamiento que se oponen a este proceso de transición energética y que en este trabajo se desmitificarán: la primera que se tratará es la que considera que invertir en la lucha contra el cambio climático supone una pérdida del bienestar social, esta idea es fácil de desmentir ya que según estimó Heal en el 2017, el coste para EE.UU. de cumplir con el Acuerdo de París es de aproximadamente entre el 0,2 y el 0,7% de su PIB, y esto haría que se redujesen en un 80% sus emisiones en el 2050 con respecto a las del 2005. Otro de los pensamientos que va en contra de este movimiento se basa en experiencias pasadas insatisfactorias en las que tratando de solucionar un fallo de mercado mediante intervención pública se empeoró la situación, por lo que podemos considerarlo como algo más bien ideológico en lugar de científico. Si se estudia económicamente el problema, se puede ver que si se produce un fallo de mercado que provoque una pérdida de eficiencia de la asignación de recursos en el mercado haría que fuese necesaria una intervención pública eficaz, que no elevada, para solucionarlo. Por último, existen personas a las que se les conoce como “escépticos moderados”, que son aquella parte de la población que reconoce la existencia del cambio climático pero que considera que pequeños aumentos de la temperatura son aceptables y que, además, pueden generar beneficios.

En la UE también han aparecido múltiples movimientos sociales contra el cambio climático como: *Fridays For Future*, Alianza por el Clima o Comunidad #PorElClima. La

primera de ellas es un movimiento surgido en Suecia y que ha sido adoptado principalmente por estudiantes de todo el mundo, mientras que los otros dos se fundaron en España y que pretenden movilizar a la ciudadanía para exigir a los poderes públicos y privados que adopten medidas eficaces y equitativas contra el cambio climático.

5. Selección de carteras eficientes para la UE de activos energéticos

En este apartado se presenta la teoría de la cartera de Markowitz como metodología apropiada para la optimización de carteras de activos reales de generación de electricidad. El objetivo de este modelo financiero se centra en definir la cartera de inversión óptima para cada inversor basándose en los principios de rentabilidad y riesgo, es decir, la cartera óptima será aquella que maximice el rendimiento aumentando el menor riesgo posible (Markowitz, 1952). En su aplicación al ámbito de la planificación de electricidad, la aplicación de la teoría de carteras permite evaluar el conjunto de tecnologías disponibles en a partir de su coste-riesgo. Con ello, se abandona el limitado planteamiento del coste mínimo individual de las tecnologías empleado en décadas anteriores a la aplicación de esta metodología. La inclusión en la cartera de nuevas tecnologías como las energías renovables, provoca un aumento de la diversificación potencial y, como existe una incorrelación entre las plantas que emplean combustibles fósiles y las que utilizan energías renovables, incluirlas en la cartera tiene un efecto positivo sobre el riesgo de la misma (De Llano, 2015).

En este capítulo se realizará un planteamiento de optimización de carteras que estará basado en el coste de la cartera, y donde habrá restricciones sobre la participación de cada tecnología. Con el modelo propuesto se pretende diseñar carteras eficientes de generación de electricidad para el 2030 y 2040 teniendo en cuenta el coste para su producción sea bajo y aceptable para la sociedad. El tipo de modelo de Markowitz que se utilizará será el tecnológico, el cual se caracteriza por incorporar restricciones a la participación de las tecnologías por horizonte.

5.1 Costes de generación de electricidad

5.1.1 Coste de generación de electricidad por tecnología

En el modelo que se utilizará en este trabajo, los costes de producción por tecnología (CP_t) están expresados en ($\text{€}/_{MW}$). Además, en la fórmula que se aplicará, estos costes están formados por el coste de inversión (INV_t) que es el coste fijo de inversión o de capital anual de la tecnología, por los costes de operación y mantenimiento ($O\&M_t$) que pueden ser tanto fijos (que hacen referencia a la capacidad instalada) como variables (son función de la producción de energía generada), el coste de combustible ($Comb_t$) que se refiere a la electricidad generada ($\text{€}/_{MWh}$) y por el coste complementario de producción ($Compl_t$) que hace referencia a la especificidad de las distintas tecnologías como, por ejemplo, la discontinuidad de que sufren la energía eólica y la fotovoltaica o la gestión de residuos en las centrales nucleares (De Llano, 2015).

$$CP_t (\text{€}/_{MW}) = INV_t + O\&M_t + Comb_t + Compl_t (\text{€}/_{MW})$$

En la Tabla 2, se muestran los costes correspondientes a cada tecnología para el 2020, 2030 y 2040 y que se emplearán en el modelo para el cálculo de las carteras de inversión óptimas. De este modo se darán a conocer cuáles son las tecnologías más baratas y las más caras.

Tecnología	Coste		
	2020	2030	2040
Nuclear	92,00	86,00	82,00
Carbón	62,00	69,00	75,00
Carbón-Captura y almacenamiento de carbono	91,14	101,43	110,25
Gas CC	84,00	91,00	95,00
Gas CC + CCS	134,40	145,60	152,00
Eólica onshore	89,00	80,00	75,00
Hidro (gran)	135,00	135,00	135,00
Hidro (mini)	108,00	106,00	104,00
Eól offshore	123,00	105,00	95,00
Solar térmica	255,00	192,00	165,00
PV(grande)	92,50	80,00	74,00

Tabla 2.- Costes por tecnologías para la UE. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).

Las tecnologías relacionadas con la producción de energía fotovoltaica, nuclear, eólica *onshore* y carbón pulverizado son las más baratas, mientras que las relacionadas con la energía solar térmica, la gran hidráulica y el gas de captura y almacenamiento de carbono son las más caras. Hay algunas tecnologías sobre las que puede apreciarse una reducción progresiva en su coste con el paso de los años como la eólica *onshore* y la *offshore* o la energía solar térmica. Por el contrario, se estima que las tecnologías empleadas para la producción de electricidad a partir del gas y el carbón aumentarán en los próximos años.

5.1.2 Coste esperado de la cartera de generación de electricidad

Según De Llano (2015) “la teoría de carteras establece el valor esperado del coste de la cartera de generación de electricidad a partir de la suma de los costes esperados totales de las distintas tecnologías de generación, ponderado cada uno de ellos por la participación -en porcentaje- de cada tecnología en la cartera”.

$$E(C_p) = \sum_t x_t E(CTG_t)$$

Esta fórmula está formada por: C_p que es el coste total de la cartera (€/MWh) mientras que x_t es la participación en la cartera p de la tecnología t . Por otro lado, las incógnitas que se pretenden obtener son las x_t . El modelo que se estudiará en este trabajo tiene la restricción de que el sumatorio de las participaciones de cada una de las tecnologías dará como resultado el total máximo de la cartera (100%).

5.1.3 Los LCOE

En el campo de la planificación energética tradicional era habitual aplicar la metodología de la alternativa menos costosa como la de mayor uso en el problema de selección de activos de generación en el sector energético y desde una perspectiva de criterio único. Esto consiste en que cada alternativa tecnológica se evalúa en función de sus costes descontados, conocidos habitualmente como *Levelised Costs Of Electricity* (en adelante, LCOE) que se según De Llano (2015) “se calculan como cociente entre costes y producción en unidades físicas descontados. La alternativa elegida para el primer caso será aquella con menor valor actual de los costes”. Además, según este mismo autor, los LCOE o costes medios de generación durante la vida útil responden al concepto de coste normalizado. La teoría de carteras se basa así mismo en esta figura para establecer el coste de las tecnologías consideradas. Su cálculo puede expresarse a través de la siguiente igualdad:

$$\sum (Inv_t + O\&M_t + Comb_t)(1+r)^{-t} = \sum LCOE(Elect_t)(1+r)^{-t}$$

Y despejando:

$$LCOE = \frac{\sum (Inv_t + O\&M_t + Comb_t)(1+r)^{-t}}{\sum (Elect_t)(1+r)^{-t}}$$

En esta ecuación Inv_t es la inversión en el año t , $O\&M_t$ representa el coste de operación y mantenimiento en el año t , mientras que $Comb_t$ son los costes de combustible en el año t , $Elect_t$ es la electricidad generada en KWh en el año t y r es el tipo de descuento. Este método descuenta las series temporales de los diferentes costes y los pasa a valores reales en un año base establecido. Mediante los LCOE se pueden

comparar diferentes instalaciones que generen un mismo producto, aunque sus tecnologías sean diferentes (Rodríguez et al., 2003).

Para Bazilian y Roques (2008) este método resulta muy eficaz y recomiendan su uso siempre y cuando no se produzca una liberalización del mercado, ya que el inversor se vería expuesto a riesgos relacionados con la inversión. Además, el mercado no permite trasladar esos riesgos a los consumidores. Para solucionar esto, los mismos autores proponen incluir el estudio de la incertidumbre o del riesgo en el proceso de decisión, en función del tipo de información disponible. En caso de disponer de probabilidades asociadas a los múltiples elementos que componen el cálculo de cada tecnología permitiría estudiar el riesgo. Según Awerbuch y Berger (2003), la aplicación de la teoría de carteras es una metodología contrastada y de gran utilidad para valorar activos de generación, ya que se incluye el cálculo del riesgo de las tecnologías y de la cartera a partir de la medida de la variabilidad (expresada a través de la desviación típica).

5.2 Riesgos de generación de electricidad

5.2.1 Riesgo estimado por tecnología

La teoría de carteras establece la existencia de aprendizaje a partir de la variabilidad pasada y que debemos utilizarla para que nos guíe en el futuro. Según De Llano (2015) “el riesgo se estima a partir de la desviación típica de los diferentes componentes del coste y las posibles relaciones entre los distintos elementos (correlaciones), es decir, mide la variabilidad del coste total”.

En el cálculo del riesgo se considera que existe incorrelación entre los diferentes tipos de coste de una misma tecnología (Jansen et al., 2006), así como que solo existe correlación entre los costes de combustible y los de emisión de CO₂ (Awerbuch y Yang, 2008) Siguiendo a De Llano (2015), se establece el coste total de generación de una tecnología a partir de la suma del coste de producción. De esta forma se incorpora el coste de inversión, de operación y mantenimiento... En este caso no se incorpora el coste de externalidad y se centra el estudio en el coste de las tecnologías. La fórmula que se ha empleado para el cálculo del coste total de generación por tecnologías (CTG_t) es:

$$CTG_t = CP_t + CE_t$$

En la Tabla 3 se exponen los riesgos asociados a cada tecnología. De este modo se darán a conocer cuáles son las tecnologías para la generación de electricidad más arriesgadas y cuáles son las más seguras.

Tecnología	Riesgo (σ^2)
Nuclear	16,89
Carbón-SCPC	28,20
Carbón-CCS	28,20
Gas CC	20,70
Gas CC + CCS	20,70
Eólica onshore	33,52
Hidro (gran)	0,00
Hidro (mini)	2,66
Eól offshore	134,33
Solar térmica	1422,04
PV(grande)	1256,70

Tabla 3.- Riesgos de cada tecnología para la UE. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).

A partir de los datos que aporta la tabla sobre el riesgo, se puede concluir que las tecnologías asociadas a la energía solar térmica y a la fotovoltaica son las de mayor riesgo. Por la contra, las asociadas a la gran hidráulica y a las mini hidráulica son las más seguras.

5.2.2 Riesgo esperado de la cartera

Se establece el riesgo de la cartera (σ_p) en función de los riesgos de cada tecnología individualmente y que, a su vez, está formado por los derivados de los distintos tipos de coste y de la interacción entre cada par de tecnologías. Para el cálculo del modelo, se asume que hay correlación entre los costes de O&M de dos tecnologías y entre los de combustible también de dos tecnologías. La Tabla

4 muestra las correlaciones entre los costes de operación y mantenimiento asumiéndose los datos de Awerbuch y Yang (2007) Por su parte, en la Tabla 5 aparece representada la matriz de correlaciones entre los costes de los combustibles y las emisiones de CO₂.

Correlaciones	Nuclear	Carbón	Carbón CAC	Gas CC	Gas CC-CAC	Petróleo	Eólica onshore	Hidro (grande)	Hidro (mini)	Eól offshore	Biomasa	PV
Nuclear	1,00	0,00	0,00	0,24	0,24	-0,17	-0,07	-0,41	-0,41	-0,07	0,65	0,35
Carbón	0,00	1,00	1,00	0,25	0,25	-0,18	-0,22	0,03	0,03	-0,22	0,18	-0,39
Carbón CAC	0,00	1,00	1,00	0,25	0,25	-0,18	-0,22	0,03	0,03	-0,22	0,18	-0,39
Gas CC	0,24	0,25	0,25	1,00	1,00	0,09	0,00	-0,04	-0,04	0,00	0,32	0,05
Gas CC-CAC	0,24	0,25	0,25	1,00	1,00	0,09	0,00	-0,04	-0,04	0,00	0,32	0,05
Petróleo	-0,17	-0,18	-0,18	0,09	0,09	1,00	-0,58	-0,27	-0,27	-0,58	0,01	-0,04
Eólica onshore	-0,07	-0,22	-0,22	0,00	0,00	-0,58	1,00	0,29	0,29	1,00	-0,18	0,05
Hidro (grande)	-0,41	0,03	0,03	-0,04	-0,04	-0,27	0,29	1,00	1,00	0,29	-0,18	0,30
Hidro (mini)	-0,41	0,03	0,03	-0,04	-0,04	-0,27	0,29	1,00	1,00	0,29	-0,18	0,30
Eól offshore	-0,07	-0,22	-0,22	0,00	0,00	-0,58	1,00	0,29	0,29	1,00	-0,18	0,05
Biomasa	0,65	0,18	0,18	0,32	0,32	0,01	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	1,00	0,25
PV	0,35	-0,39	-0,39	0,05	0,05	-0,04	0,05	0,30	0,30	0,05	0,25	1,00

Tabla 4.- Coeficientes de correlación entre costes de O&M. Fuente: Elaboración propia a partir de datos contenidos en Awerbuch y Yang (2007).

Comb & CO ₂	Nuclear	Carbón	Gas natural	Oil	Biomasa	Co ₂
Nuclear	1.00	0.97	0.99	0.88	-0.31	0.89
Carbón	0.97	1.00	0.92	0.97	-0.53	0.99
Gas natural	0.99	0.92	1.00	0.79	-0.15	0.97
Oil	0.88	0.97	0.79	1.00	-0.72	0.92
Biomasa	-0.31	-0.53	-0.15	-0.72	1.00	-0.40
Co ₂	0.89	0.99	0.97	0.92	-0.40	1.00

Tabla 5.- Matriz de correlaciones entre costes de combustibles y emisiones de CO₂. Fuente: elaboración propia a partir de datos de (IEA 2019).

La expresión matemática para el cálculo del riesgo de la cartera (σ_p) está formada por: x_t que es la participación en tanto por uno de cada tecnología t en la cartera p , por σ_t que representa la desviación típica que tiene el coste de la tecnología t y $C_k t_i$ que es el componente del coste k de la tecnología i (De Llano, 2015).

$$\sigma_p = \left\{ \sum_{t=1}^{12} x_t^2 + \sigma_t^2 + \sum_{t_1=1}^{12} \sum_{t_2=1, t_1 \neq t_2}^{12} \left(\sum_{\forall C_1} \sum_{\forall C_2} \sigma_{C_1 t_1} \sigma_{C_2 t_2} \rho_{C_1 t_1 C_2 t_2} \right) x_{t_1} x_{t_2} \right\}^{1/2}$$

5.3 Modelo tecnológico de Markowitz

El output del modelo de optimización de carteras de tecnologías de Markowitz muestra la frontera de carteras eficientes, que está formada por aquellas carteras de inversión que minimiza el riesgo esperado para un nivel de coste dado gracias a una selección adecuada de los activos que formarán la cartera. Adicionalmente, este modelo incorpora dos restricciones denominadas como técnicas: la suma de las participaciones de las tecnologías debe ser igual al 100%, y la no negatividad de la participación de las tecnologías. A estas restricciones se les unen las que limitan la participación de cada una de las tecnologías en función del horizonte analizado teniendo en cuenta la información en clave de prospectiva tecnológica para cada activo real. Las limitaciones de participación máxima para cada tecnología considerada pretende alcanzar resultados realistas y aplicables a diferencia de lo que ocurriría con un modelo de optimización sin restricciones de participación para las tecnologías (De Llano, 2015) Como se señaló, los límites de participación de las distintas tecnologías varía en función del horizonte que consideramos.

Estos límites se calcularon a partir de datos de la IEA (*International Energy Agency, 2019*) tomando como referencia su participación en la cartera de generación de electricidad. Mediante estos datos se obtuvieron las proporciones de participación de las políticas declaradas, las políticas actuales y del desarrollo sostenible y se tomaron sus máximos como puede verse en la Tabla 6. El escenario de políticas declaradas hace referencia a como sería la situación en el caso de que se aplicasen las políticas que la UE ha anunciado. El de las políticas actuales muestra la situación si se continuasen utilizando las políticas actuales. El escenario del desarrollo sostenible consiste en asumir que la UE va a llevar a cabo políticas que satisficiesen las necesidades presentes sin comprometer el futuro. Los horizontes que se analizarán en este trabajo son 2020, 2030 y 2040. El estudio de la situación en 2020 permite conocer el estado actual mientras que el estudio del 2030 y 2040 permite estimar la evolución del modelo energético de la UE en los próximos años para así conocer cuáles serían las medidas más beneficiosas.

Tecnología	Participación máxima (%)		
	2020	2030	2040
Nuclear	27,25%	19,87%	17,40%
Carbón-SCPC	21,89%	13,63%	7,91%
Gas CC	20,68%	18,86%	20,56%
Eólica onshore	11,73%	27,13%	35,64%
Hidro-gr	9,81%	10,45%	10,42%
Hidro-mini	1,34%	1,24%	1,42%
Eól offshore	1,16%	2,68%	3,53%
Solar térmica	0,16%	0,38%	0,87%
PV(grande)	4,08%	9,74%	10,16%

Tabla 6.- Límites de participación de las tecnologías para la UE. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).

5.3.1 Expresión matemática del modelo

Se propone, a continuación, la expresión matemática del modelo de optimización cuadrática a partir de la propuesta de De Llano (2015) Mediante la aplicación de esta fórmula se busca conocer las participaciones óptimas de inversión, es decir, aquellas que minimizan el riesgo y el coste. Además, el modelo consta de una restricción a la participación de cada una de las tecnologías.

$$\text{Min}\{\sigma_p\} = \text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^{12} x_t^2 \sigma_t^2 + \sum_{t_1=1}^{12} \sum_{t_2=1, t_1 \neq t_2}^{12} \left(\sum_{C_1} \sum_{C_2} \sigma_{C_1 t_1} \sigma_{C_2 t_2} \rho_{C_1 t_1, C_2 t_2} \right) x_{t_1} x_{t_2} \right\}^{1/2}$$

Sujeto a:

$$E(C_p) = \sum_T x_t E(CTG_t) = \sum_T x_t E(CP_t + CE_t)$$

$$x_t \leq \text{Participación máxima de tecnología } t, \forall t$$

$$\sum_T x_t = 1$$

$$\forall t \in T : x_t \geq 0$$

5.3.2 Carteras eficientes UE 2020, 2030 y 2040

En este apartado se analizarán las carteras solución ofrecidas por el modelo. Es necesario destacar que son un total de 11 las tecnologías consideradas en el modelo, definidas como activos reales de generación de electricidad –plantas-. Estas tecnologías están llamadas a participar en las carteras eficientes de inversión que ofrece el modelo. El conjunto de carteras eficientes forman la frontera eficiente: formada por las carteras que minimizan el riesgo para un coste dado. De tal forma que no sería posible encontrar una cartera con menor riesgo, si no es a costa de incrementar el coste, o de menor coste si no se incrementa el riesgo asumido. La curva de Markowitz que se obtiene se caracteriza por tener una forma convexa, ya que en el eje de ordenadas se representa el coste mientras que el riesgo se sitúa en el eje de abscisas. Si el riesgo estuviese en el eje de abscisas y el coste en el eje de ordenadas la frontera eficiente estaría limitada por la izquierda por la cartera de mínimo riesgo y por la derecha por la de mínimo coste. Las carteras que se considerarían ineficientes estarían situadas por encima de la frontera eficiente como puede observarse en la Ilustración 10, ya que esas carteras estarían identificando la asunción del mismo riesgo para un coste superior.

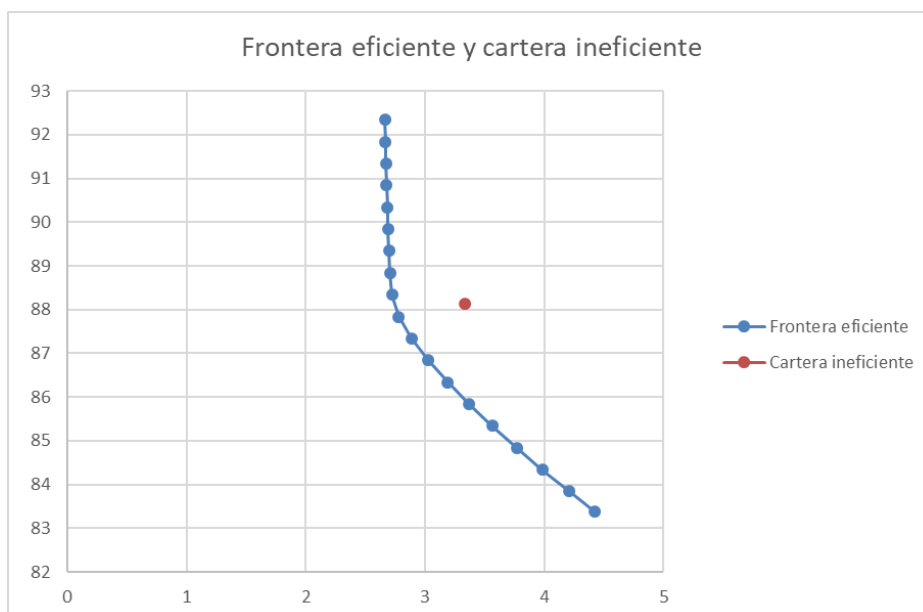


Ilustración 10.- La frontera eficiente y las carteras ineficientes. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).

5.3.2.1 Año 2020

Para el año 2020 podemos definir la cartera de tecnologías para la UE. La Tabla 7 muestra el peso de cada tecnología en la cartera actual (IEA, 2019).

Tecnología	Participación
Nuclear	27,25%
Carbón-SCPC	21,89%
Gas CC	20,68%
Eólica onshore	11,73%
Hidro-gr	9,81%
Hidro-mini	1,34%
Eólica offshore	1,16%
Solar térmica	0,16%
PV(grande)	4,08%
Coste	88,26
Riesgo	2,496
Coste-riesgo	2,83%

Tabla 7.- Participación de las tecnologías en la cartera actual (2020). Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).

Como puede apreciarse, la tecnologías que mayor importancia tienen en la cartera actual de la UE son la nuclear (27%), la del carbón (21%) y la del gas natural (20%), que representan conjuntamente más de dos tercios del total. También destaca la eólica *onshore* (11%), que es aquella energía eólica que se produce en tierra.

5.3.2.2 Año 2030

Para diseñar la frontera de carteras eficientes para el año 2030 (Ilustración 11) se han considerado las restricciones de participación máxima para cada tecnología. Con ello se pretenden mostrar los activos energéticos más interesantes para formar parte de la cartera en función de su coste-riesgo. De los resultados que se obtengan con la aplicación del modelo tecnológico de Markowitz se analizarán en particular la composición de las dos carteras que funcionan como extremo de la frontera

eficiente: la cartera de mínimo riesgo y la de mínimo coste. Las participaciones en estas carteras aparecen en la Tabla 8.

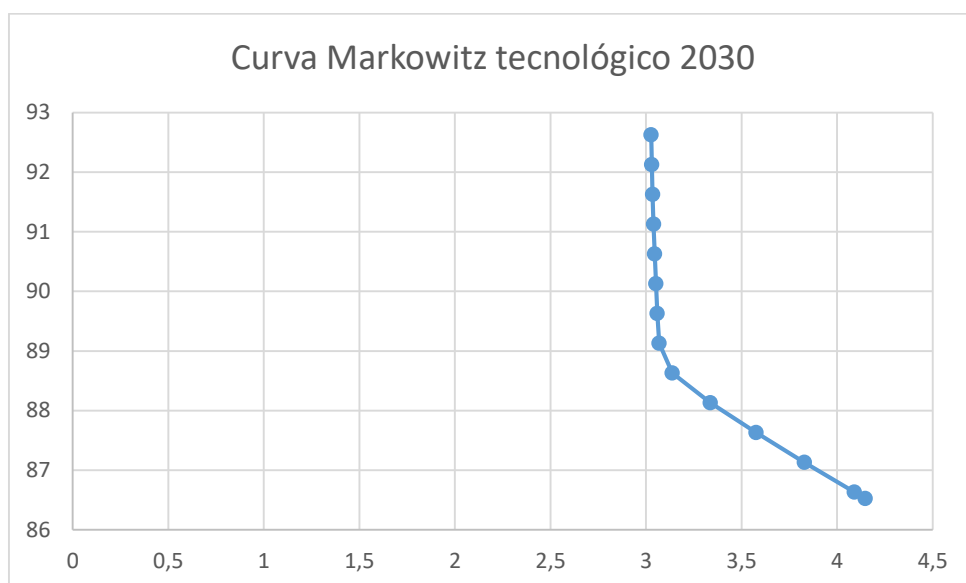


Ilustración 11.- Curva de Markowitz 2030 del modelo tecnológico. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).

Modelo tecnológico	Mínimo riesgo	Mínimo coste
Nuclear	19,87%	19,87%
Carbón	10,31%	13,63%
CCS Carbon	3,32%	0,00%
Gas	14,06%	18,86%
CCS Gas	4,80%	0,00%
Eólica onshore	27,13%	27,13%
Hidro (gran)	10,45%	6,85%
Hidro (mini)	1,24%	1,24%
Eólica offshore	2,68%	2,68%
Biomasa	0,38%	0,00%
PV	5,76%	9,74%
Total renovables	47,64%	47,64%
Riesgo	3,03	4,15
Coste	92,63	86,53
Coste-riesgo	3,27%	4,79%

Tabla 8.- Carteras de mínimo riesgo y mínimo coste para la UE en 2030. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).

La cartera de mínimo riesgo es indicativa de qué tecnologías tienen que formar el parque de generación de electricidad para poder asumir así el menor riesgo posible. Además, se caracteriza por ser la más diversificada. De esta forma, cuanto mayor sea la variedad de tecnologías que participan en la cartera, menor será la probabilidad de que la ruptura de suministro relacionada con alguna tecnología pueda suponer una ruptura de suministro total. Por otro lado, la cartera de mínimo coste es aquella que supone un menor desembolso económico por parte del inversor. La participación de las energías renovables con respecto al 2020, alcanzan en su conjunto un relevante del 47,64% del total. Cabe destacar que tienen la misma participación en la cartera de mínimo riesgo y en la de mínimo coste, sin embargo, no mantienen la misma participación individual en las dos carteras, en la de mínimo riesgo la biomasa y la gran hidráulica la aumentan mientras que en la cartera de mínimo riesgo es la fotovoltaica la que incrementa su participación.

Las tecnologías preferentes son aquellas en las que la participación en la cartera de generación alcanzarían el límite máximo permitido en la Tabla 6. Ello sería indicativo de que en caso de no existir esta restricción, participarían en mayor medida. En esta cartera, las tecnologías preferentes son la energía nuclear, el gas natural, el carbón, la energía mini hidráulica y la energía eólica *offshore*. Además, todas ellas participan hasta el límite tanto en la cartera de mínimo riesgo como en la de mínimo coste. El carbón y gas natural aunque se utilicen en sus máximos en ambas carteras, en la de mínimo riesgo se utilizan tecnologías que incorporan la tecnología de almacenamiento y captura de carbono (CAC, en adelante), ya que así se diversifica más y, por tanto, se reduce el riesgo.

Si se comparan estas carteras de inversión con la del 2020 se puede apreciar una reducción considerable de la inversión en combustibles fósiles y en energía nuclear, mientras que la eólica *onshore* casi triplica su participación y se convierte en la tecnología con mayor peso en la cartera de inversión. La tecnología relacionada con la energía fotovoltaica tiene un riesgo más elevado que su coste, por ello se aprecia una diferencia de aproximadamente 5% entre su participación en la cartera de mínimo riesgo y la de la cartera de mínimo coste, mientras que a la energía gran hidráulica y a la biomasa les sucede lo opuesto. En lo que se refiere al coste-riesgo, todas las carteras de inversión tienen un valor inferior al 5% y, por tanto, sería recomendable invertir en ellas.

5.3.2.3 Año 2040

Del mismo modo que para el 2030, para el año 2040 también se aplicó el modelo tecnológico de Markowitz para estimar las carteras eficientes de inversión para la UE en este año, y así mostrar cuáles son los activos energéticos en los que se debe invertir para alcanzar así el menor riesgo o el menor coste posible a la hora de generar electricidad. En la Ilustración 12, el coste se representa en eje de ordenadas y el riesgo en el eje de abscisas, a parte de esto, en este gráfico se incluirá la frontera eficiente tanto del 2030 como la del 2040 para poder observar su evolución.

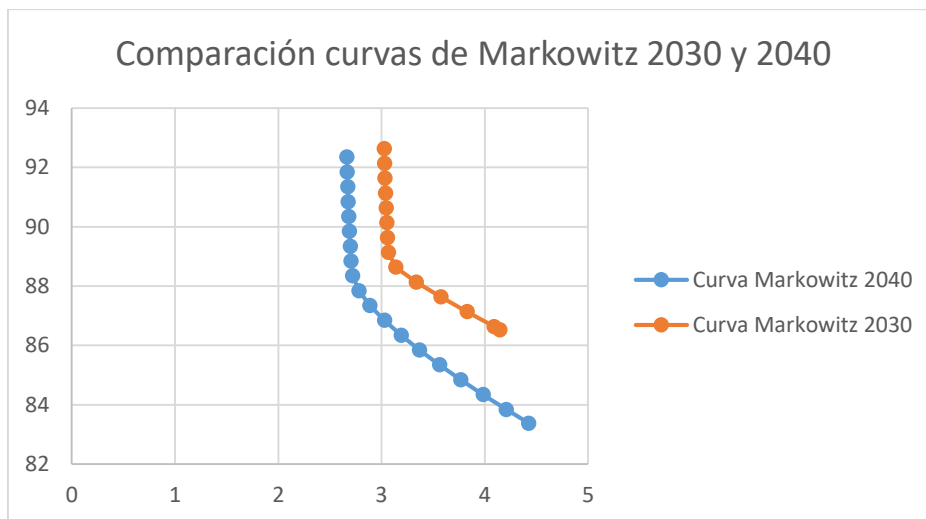


Ilustración 12.- Comparación de las curvas de Markowitz 2030 y 2040. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).

La frontera eficiente para el 2040 se encuentra más próxima al origen, lo que implicaría que las carteras de inversión que la componen permiten alcanzar menores valores del riesgo que las de la frontera eficiente del 2030. Al igual que se realizó para el 2030, la Tabla 9 muestra las participaciones de cada una de las tecnologías que conforman la cartera eficiente de mínimo riesgo y la del mínimo coste.

Modelo tecnológico	Mínimo riesgo	Mínimo coste
Nuclear	17,40%	17,40%
Carbón	7,10%	7,91%
CCS Carbon	0,81%	0,00%
Gas	14,25%	20,56%
CCS Gas	6,31%	0,00%
Eólica onshore	35,64%	35,64%
Hidro (gran)	10,42%	3,38%
Hidro (mini)	1,42%	1,42%
Eólica offshore	3,53%	3,53%
Biomasa	0,87%	0,00%
PV	2,25%	10,16%
Total renovables	54,13%	54,13%
Riesgo	2,66	4,43
Coste	92,34	83,37
Coste-riesgo	2,89%	5,31%

Tabla 9.- Carteras de mínimo riesgo y mínimo coste para la UE en 2040. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).

Del análisis de las carteras eficientes para el 2040, se puede extraer la idea de que la UE continúa su progreso hacia un sistema basado en el uso de energías renovables ya que para este año ya representarían el 54,13% de la inversión total, lo que supondría un aumento con respecto al 47,64% del 2030. Al igual que ocurría en el 2030, en el 2040 la participación de las renovables coincide en las dos carteras extremas analizadas, a pesar de que la participación individual de las mismas no sea la misma en ambas. En la de mínimo riesgo la biomasa y la gran hidráulica aumentan su participación mientras que la fotovoltaica lo hace en la de mínimo coste.

La energía nuclear, la energía mini hidráulica, el gas natural, el carbón, la energía eólica tanto *onshore* como *offshore* son tecnologías preferentes, es decir, en las que habría una mayor inversión si no existiesen límites a su participación. Las tecnologías que mayor crecimiento tienen en las carteras de inversión en relación a las del 2030 son energía eólica *onshore*, el gas natural y la eólica *offshore*. Con ello, se puede considerar que la energía eólica *onshore* se consolida como la fuente de energía fundamental del modelo energético futuro de la UE. Las tecnologías que se verán más perjudicadas son la energía nuclear y el carbón, continuando con su tendencia a la baja. La energía fotovoltaica tiene un menor coste asociado que

riesgo, por lo que su participación en la cartera de mínimo coste es mucho mayor que la que tiene en la cartera de mínimo riesgo, al contrario de lo que sucede con la biomasa y la gran hidráulica que aumentan su participación en la cartera de mínimo riesgo en relación a la de mínimo coste.

Hay que destacar que el margen de variación del coste-riesgo aumentó con respecto a las carteras de inversión en el 2030 donde se situaba entre el 3,27% y el 4,79% mientras que en el 2040 se encuentra entre el 2,89% y el 5,31%.

5.3.3 Comparación con el modelo de Markowitz puro

En este apartado se mostrará la diferencia entre las carteras de inversión óptimas que se obtienen en función de si se aplican o no restricciones a la participación de las tecnologías. Para ello, se mostrarán tablas en las que aparezcan las participaciones en las carteras de inversión para los años 2030 y 2040 aplicando el modelo de Markowitz puro y el tecnológico.

5.3.3.1 Año 2030

Como se comentó en la introducción de este apartado, los datos que se muestran en la Tabla 10 están calculados mediante la aplicación del modelo de Markowitz. Los porcentajes que aparecen en la columna de “Markowitz puro” son las participaciones que tendrían las distintas tecnologías si existiese una completa libertad de elección en la participación, esto es, si el diseño de la cartera no estuviera condicionado por la inversión en años anteriores en función de la planificación energética del territorio. Los que se sitúan en la columna “Modelo tecnológico” es el peso de cada tecnología en la cartera de inversión para el 2030 si existiesen restricciones a la participación.

Tecnologías	Markowitz puro	Modelo tecnológico	
		Minimo riesgo	Minimo coste
Nuclear	2,34%	19,87%	19,87%
Carbón	0,00%	10,31%	13,63%
CCS Carbon	0,00%	3,32%	0,00%
Gas	0,00%	14,06%	18,86%
CCS Gas	0,22%	4,80%	0,00%
Eólica onshore	0,00%	27,13%	27,13%
Hidro (gran)	97,41%	10,45%	6,85%
Hidro (mini)	0,00%	1,24%	1,24%
Eólica offshore	0,00%	2,68%	2,68%
Biomasa	0,03%	0,38%	0,00%
PV	0,00%	5,76%	9,74%
Total renovables	97,44%	47,64%	47,64%

Tabla 10.- Comparación resultados 2030 modelo Markowitz puro y modelo tecnológico. Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).

Como era de esperar, los datos obtenidos son muy distintos en función del modelo que se aplique. Los resultados del modelo de Markowitz puro son muy anárquicos, la cartera óptima está formada casi en su totalidad por energía hidráulica, mientras que el resto de la inversión se la reparten la biomasa, el gas natural y la energía nuclear. Alternativamente, el modelo tecnológico de Markowitz considera que es necesario realizar una mayor diversificación en la inversión y esto se traduce en que cinco tecnologías superan el 10% de participación. Con estos datos se puede comprender mejor por qué se considera que el modelo de Markowitz puro muestra resultados teóricos que no tienen cabida en la realidad, ya que si se produjese algún suceso que perjudicase a la energía gran hidráulica todo el sistema energético de la UE se tambalearía.

5.3.3.2 Año 2040

Del mismo modo que se realizó para el 2030, en este apartado la Tabla 11 compara los resultados óptimos de inversión que se obtienen en función de si se aplica el modelo de Markowitz puro o si se emplea el modelo tecnológico de Markowitz.

Tecnologías	Markowitz puro	Modelo tecnológico	
		Minimo riesgo	Minimo coste
Nuclear	2,34%	17,40%	17,40%
Carbón	0,00%	7,10%	7,91%
CCS Carbon	0,00%	0,81%	0,00%
Gas	0,00%	14,25%	20,56%
CCS Gas	0,22%	6,31%	0,00%
Eólica onshore	0,00%	35,64%	35,64%
Hidro (gran)	97,41%	10,42%	3,38%
Hidro (mini)	0,00%	1,42%	1,42%
Eólica offshore	0,00%	3,53%	3,53%
Biomasa	0,03%	0,87%	0,00%
PV	0,00%	2,25%	10,16%
Total renovables	97,44%	54,13%	54,13%

Tabla 11.- Comparación resultados 2040 modelo Markowitz puro y modelo tecnológico Fuente: elaboración propia a partir de datos de IEA (2019).

Los datos obtenidos a partir de la aplicación del modelo de Markowitz puro para el 2040 son exactamente los mismos que los obtenidos para el 2030, lo que refleja en todavía mayor medida su imposible aplicación en la realidad. Aunque es necesario destacar que la cartera de inversión óptima del modelo de Markowitz puro está formada en casi un 98% por energías renovables, mientras que en los resultados que se obtienen mediante la aplicación del modelo tecnológico se puede apreciar una tendencia al alza de la inversión en las tecnologías relacionadas con este tipo de fuentes de energía.

Conclusiones

A lo largo de este trabajo se ha tratado de evidenciar respuesta en clave de política energética que propone la UE para resolver el reto ambiental y energético al que va a hacer frente los próximos 20 años. El modelo tecnológico de la UE ha estado basado en su mayoría en el uso de combustibles fósiles que emiten una gran cantidad de GEI y que son los principales responsables del cambio climático. La cada vez mayor concienciación se ha traducido en unos acuerdos cada vez más restrictivos sobre la emisión de GEI y que han culminado con la propuesta europea de transición energética denominada “Pacto Verde Europeo”, que tiene como objetivo final que la UE sea climáticamente neutra en el año 2050. Además, este “Pacto Verde” también ratifica medidas para la descarbonización del sistema energético, así como la modificación de los sectores más contaminantes como el del transporte o el de la industria. Con esto, la UE pretendería además aumentar su eficiencia energética, y de ese modo, poder reducir su consumo.

Los datos expuestos en este trabajo exponen la necesidad llevar a cabo una transición energética por parte de la UE. Por su parte, la UE tiene grandes incentivos para ello, ya que obtendría grandes beneficios tanto a nivel económico como medioambiental. Desde el punto de vista económico, la UE dejaría de importar gran parte de los combustibles fósiles (en 2017 el 55% de la energía que se consumió en la UE era importada) y aprovecharía las fuentes de energía que se encuentran disponibles en su territorio, lo que se traduciría en una menor dependencia energética. En lo referido al medio ambiente, una mayor inversión de la UE en las fuentes de energía renovables le permitiría colocarse a largo plazo en los primeros puestos de la economía mundial. Aunque no todo es bueno, la transición energética puede tener graves consecuencias económicas en aquellos países que tengan una fuerte dependencia de los combustibles fósiles. Por ello, la UE se comprometió a apoyar económicamente a los países que lo necesiten para que la transición les resulte lo menos traumática posible: se busca una transición energética justa.

Para solucionar el problema energético en el que se encuentra la sociedad actual no llega únicamente con la actuación de los gobiernos, sino que es necesario llevar a cabo una acción colectiva, es decir, las personas deben modificar su estilo de vida. Este trabajo propone una manera de conseguirlo, mediante la implementación de la economía circular, lo que permitiría un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles, alargando su ciclo de vida, y permitiría reducir los residuos generados.

Por último, mediante la aplicación del modelo tecnológico de Markowitz para el cálculo de las carteras eficientes de inversión para la UE en los horizontes 2030 y 2040 se pudo corroborar el necesario aumento en la participación de las energías renovables en el modelo energético de la UE pasando de representar un 28,28% en el 2020 al 54,13% en el año 2040.

Además, este modelo también muestra que la energía eólica *onshore* es la fuente de energía más rentable desde un planteamiento coste-riesgo y en la que debe basarse el modelo energético futuro de la UE. Esta tecnología pasa de participar en un 11,73% en el año 2020 al 35,64% en la cartera eficiente de inversión para el 2040.

Así mismo, este modelo permite definir en qué tecnologías debería invertir la UE en función de si pretende minimizar el riesgo (mayor participación de la tecnología gran hidráulica) o minimizar el coste (mayor participación de la energía fotovoltaica).

La energía nuclear, el gas natural, el carbón, la energía mini hidráulica y la energía eólica *offshore*, son las tecnologías que alcanzan el límite de participación máxima en todas las carteras que forman la frontera eficiente, indicativo de que se trata de tecnologías preferentes tanto para 2030 como para 2040. Estas tecnologías están llamadas a ser relevantes y su participación es obligatoria para alcanzar la eficiencia.

También es necesario destacar la caída en la participación de los combustibles fósiles ya que todos ellos perderían el peso actual en su sistema energético con excepción del gas natural que mantendría su cuota. Los datos obtenidos a partir de este modelo también mostraron que las carteras de inversión de la UE con el paso de los años tenderán a ser más eficientes por una reducción en su riesgo asociado en los horizontes analizados.

Bibliografía

- Awerbuch, S., & Berger, M. (2003). *Applying portfolio theory to EU electricity planning and policy-making (EET/2003/03)*. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20354690>
- Awerbuch, S., & Yang, S. (2008). Using Portfolio Theory to Value Power Generation Investments. En M. Bazilian & F. Roques (Eds.), *Analytical Methods for Energy Diversity and Security: Portfolio Optimization in the Energy Sector: A Tribute to the Work of Dr Shimon Awerbuch* (Vol. 12, pp. 61-68). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-056887-4.00003-2>
- Bazilian, M. y Roques, F. (2008). Using Portfolio Theory to Value Power Generation Investments. In Bazilian, M. y Roques, F. (Eds.), *Analytical Methods for Energy Diversity and Security* (p.p. 61-69). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Becker, C. U. (2011). *Ethical Aspects of the Energy Issue: Toward a Sustainable Energy Future* (SSRN Scholarly Paper ID 1768194; Número ID 1768194). Social Science Research Network. <https://papers.ssrn.com/abstract=1768194>
- Belda Hériz, I. (2018). *Economía circular*. Editorial Tébar Flores. <https://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=5513796>
- Bermejo, R. (2013). Ciudades postcarbono y transición energética. *Revista de Economía Crítica*, 16, 215-243.
- Bulege Gutiérrez, W. (2015). Vista de COP 21: Acuerdo contra el cambio climático en París. *Apuntes de Ciencia y Sociedad*, 5(2), 186-187. <http://dx.doi.org/10.18259/acs.2015027>

Cambia la cita en el texto. (s. f.).

Capros, P., European Commission, Directorate-General for Energy and Transport, European Commission, Climate Action DG, European Commission, & Directorate General for Mobility and Transport. (2016). *EU reference scenario 2016: Energy, transport and GHG emissions : trends to 2050*. Publications Office of the European Union.

Carretero Peña, A. (2018). *Aspectos ambientales*. AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación.

<https://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=5634420>

Comisión Europea. (2019a). *Biodiversidad* [Text].

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/fs_19_6728

Comisión Europea. (2019b). *Construir y renovar* [Text].

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/fs_19_6725

Comisión Europea. (2019c). *De la granja a la mesa* [Text].

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/fs_19_6727

Comisión Europea. (2019d). *Eliminar la contaminación* [Text].

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/fs_19_6729

Comisión Europea. (2019e). *Energía limpia* [Text].

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/fs_19_6723

Comisión Europea. (2019f). *Movilidad sostenible* [Text]. European Commission - European Commission. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/fs_19_6726

Comisión Europea. (2019g). *Una industria sostenible* [Text].

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/fs_19_6724

Comisión Europea. (2020). *Plan de acción para una economía circular* (Text FS/20/437).

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/fs_20_437

Creus, A. (2000). *Energías renovables (2a. Ed.)*. Cano Pina.

<http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3227170>

Dwyer, B., & Efrón, A. (2017). *Eficiencia energética en la supply chain: Economía circular en la práctica*.

Ellen McArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy* (1/2013).

<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>

European Commission. (2016). *Climate negotiations* [Text]. Climate Action - European Commission. https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations_en

European Commission. (2019). *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: The European Green Deal* (COM(2019) 640 final). https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf

Eurostat. (2020a). Infograph 2.1 Where does our energy come from? En *Shedding light on energy on the EU: Where does our energy come from?*
<https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-2a.html>

Eurostat. (2020b). Infograph 2.2 What do we produce in the EU? En *Shedding light on energy on the EU: What do we produce in the EU?*
<http://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-2b.html>

Eurostat. (2020c). Infograph 2.3. From where do we import energy and how dependent are we? En *Shedding light on energy on the EU*.
<https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-2c.html>

- Eurostat. (2020d). Infograph 4.1 How are emissions of greenhouse gases by the EU evolving? En *Shedding light on energy on the EU*.
<https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-4a.html>
- Eurostat. (2020e). Infograph 4.2 How efficient are we in our consumption of energy? En *Shedding light on energy on the EU: How efficient are we in our consumption of energy?* <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-4b.html>
- Eurostat. (2020f). Infograph 4.3 What is the share of renewable energy in the EU? En *Shedding light on energy on the EU: What is the share of renewable energy in the EU?* <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy/bloc-4c.html>
- Fern, o de L. P. (s. f.). *Un modelo para la selección de carteras eficientes de activos energéticos en el marco de la Unión Europea: Um modelo para a seleção de carteiras eficientes de ativos energéticos no âmbito da Uniao Europeia*. 333.
- González Velasco, J. (2020). *Energías renovables*. Reverté.
- González-Eguino, M. (2014). *La pobreza energética y sus implicaciones*.
<http://hdl.handle.net/10810/14275>
- International Energy Agency, D. F. (2019). *Worldenergy Outlook 2019* (November 2019).
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- Jansen, J. C., Beurskens, L. W. M., & van Tilburg, X. (s. f.). *Application of portfolio analysis to the Dutch generating mix*. 67.
- Jarauta Rovira, L. (2015). *Las energías renovables*. Editorial UOC.
<http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=4536338>
- Markowitz, H. (1952). Portfolio Selection. *The Journal of Finance*, 7(1), 77-91. JSTOR.
<https://doi.org/10.2307/2975974>

- New Climate Institute. (2020, mayo 5). *Climate Change Performance Index*. Climate Change Performance Index. <https://www.climate-change-performance-index.org/>
- Rodríguez Amenedo, J. L., Arnalte Gómez, S., & Burgos Díaz, J. C. (2003). *Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*. Rueda.
- Spiegel, E., & Norton, R. (2000). *La nueva era del cambio energético: Opciones para impulsar el futuro del planeta*. McGraw-Hill España.
<http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3196022>
- Terceiro Lomba, J. (2019). Transición energética. *Anales*, 96.
<https://www.racmyp.es/docs/anales/a96-12.pdf>
- The Paris Agreement* / UNFCCC. (2020, marzo 17). <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- United Nations. (2014). *What is the United Nations Framework Convention on Climate Change?* / UNFCCC. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change>
- United Nations. (2020). *Nationally Determined Contributions (NDCs)* / UNFCCC.
<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/nationally-determined-contributions-ndcs#eq-2>
- Vowles, N. (2019, agosto 14). Wind it up: Europe has the untapped onshore capacity to meet global energy demand. *The University of Sussex*.
<http://www.sussex.ac.uk/broadcast/read/49312>